



Psychomécanique des sons transitoires rayonnés par des plaques

Florence Demirdjian

► To cite this version:

Florence Demirdjian. Psychomécanique des sons transitoires rayonnés par des plaques. Mécanique [physics.med-ph]. Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2006. Français. NNT: . tel-00514438

HAL Id: tel-00514438

<https://theses.hal.science/tel-00514438>

Submitted on 2 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE LA MEDITERRANEE AIX-MARSEILLE II

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE AIX-MARSEILLE II

Discipline : Mécanique

Option : ACOUSTIQUE

soutenue le 28 juin 2006

au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

par

Florence DEMIRDJIAN

Titre :

**PSYCHOMECHANIQUE DES SONS
TRANSITOIRES RAYONNES PAR DES
PLAQUES**

Directrices de thèse :

Dominique HABAUT – Sabine MEUNIER

JURY

Pr. Nacer Hamzaoui	Laboratoire Vibrations Acoustique à l'INSA de Lyon	Rapporteur
Pr. Christian Lorenzi	Institut de Psychologie, Université Paris 5	Rapporteur
Pr. Antoine Chaigne	ENSTA	Examineur
Dr. Pierre-Etienne Gautier	Direction de l'Innovation et de la recherche, SNCF	Examineur
Dr. Dominique Habault	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique	Co-directrice de thèse
Dr. Sabine Meunier	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique	Co-directrice de thèse

À ma soeur et à mon frère Viviane et Hervé,

Remerciements

Pour commencer, je remercie mes deux directrices de thèse. Tout d'abord, Dominique pour la qualité de son encadrement, puis Sabine avec qui j'ai partagé des discussions enrichissantes et de plus très agréables. J'ajoute que j'ai apprécié leur soutien qui n'a pas fléchi avant et pendant la thèse.

Les travaux exposés dans ce manuscrit sont le fruit d'une collaboration psychomécanique qui m'a apporté satisfaction et qui j'espère se pérenisera...

Je remercie Nacer Hamzaoui, Christian Lorenzi, Antoine Chaigne et Pierre-Etienne Gautier d'avoir accepté d'être les membres de mon jury.

Au passage, je dresse une haie d'honneur à Pierre-Olivier Mattei sans qui je ne me serais peut-être pas lancé dans cette psychothèse et à Georges Canévet qui m'aura offert ses précieux conseils (quelle chance !) tout au long de ces années.

Je n'oublierai pas les membres des équipes SACADS/APIM et tout particulièrement Guy, Manu, Mathieu, Isa, Manue, Stefan, Lionel et Aurélie pour les bons moments (scientifiques ou pas) passés avec eux.

Je remercie Sébastien Divoir pour sa contribution sur la hauteur tonale.

D'un point de vue plus personnel je pense à mon frère, à ma soeur et à ma maman qui m'ont éclairé le chemin pendant toutes ces longues années d'études. Il en va de même pour mon amie Valérie qui aura toujours été encourageante à mon égard.

Enfin, je garde le meilleur pour la fin en remerciant celui qui partage mon quotidien depuis l'année du bac français (quatre consonnes et trois voyelles...!) et qui me soutient davantage de jour en jour.

Résumé

Cette thèse présente une recherche en psychomécanique qui est une combinaison d'études vibroacoustiques et psychoacoustiques. Un des buts de la psychomécanique est d'identifier les attributs perceptifs qui sont pertinents pour la perception auditive de sons rayonnés par des structures vibrantes.

Le travail porte sur la perception des sons rayonnés par une plaque mince, rectangulaire, encastrée, bafflée et soumise à une excitation de durée finie. Trois études ont été réalisées.

La première étude met en évidence l'effet perceptif de la variation des paramètres mécaniques de la plaque (amortissement) ou de l'excitation (durée et lieu d'impact) en terme de perception de la qualité et de la similarité des sons. Une analyse multidimensionnelle des sons a montré que les dimensions perceptives traduisant les différences entre les sons étaient : la brillance, la tonalité sur la portion des sons dite "résonante" et l'acuité sur la portion dite "initiale". Pour les estimations d'agrément, deux groupes de sujets se sont distingués. Une première moitié du groupe a basé ses jugements sur la brillance des sons estimant que l'agrément décroissait avec une augmentation de brillance. Les jugements de la seconde moitié des sujets étaient basés sur l'intérêt musical des sons ; plus les sons étaient amortis, moins ils présentaient un intérêt musical, moins ils étaient agréables.

La seconde étude concerne le problème de la simplification de modèles complexes de plaques en se basant sur des critères perceptifs. La complexité concerne l'épaisseur de la plaque. Il est montré qu'un son de plaque d'épaisseur variable peut être perceptivement similaire à un son de plaque d'épaisseur constante "équivalente" ; le critère de similarité étant la hauteur tonale des sons déterminée par la composante spectrale de plus forte intensité.

La dernière étude aborde le problème de la comparaison entre sons enregistrés et sons synthétisés de plaques. Le but est d'identifier les paramètres importants à prendre en compte dans le calcul de telle sorte que le son synthétisé soit le plus proche du son enregistré d'un point de vue perceptif. Les résultats montrent que, dans notre cas, le son synthétisé le plus proche du son enregistré correspond à une concordance de hauteur tonale, de fluctuation de niveau et de décroissance des signaux.

Table des matières

Introduction	13
1 Etat de l'art	17
1.1 Effets perceptifs de la variation de paramètres d'une structure	18
1.1.1 Paramètres acoustiques et perceptifs résultant de la variation de paramètres mécaniques ou géométriques	18
1.1.2 Reconnaissance de sources	23
1.1.2.1 Matériau	23
1.1.2.2 Géométrie	24
1.1.3 Synthèse et discussion	28
1.1.4 Définition de la psychomécanique	31
1.2 Indicateurs psychoacoustiques des sons transitoires	32
1.2.1 La sonie	32
1.2.2 La hauteur tonale	33
1.2.3 Le timbre	34
1.2.4 L'acuité	35
1.2.5 Les fluctuations de niveau	35
1.3 Présentation des travaux	36
2 Synthèse des signaux de plaques encastrées	37
2.1 Modèle théorique : Pression rayonnée par la plaque	38
2.2 Effet de la variation de paramètres du système sur le champ de pression rayonné	43
2.2.1 Epaisseur de la plaque	43
2.2.2 Longueur et largeur de la plaque	43
2.2.3 Amortissement de la structure	44
2.2.4 Durée d'impact	46
2.2.5 Lieu d'impact	47
2.3 Conclusions	48
3 Effet perceptif de la variation de paramètres de la structure et de l'excitation	49
3.1 Objectifs	49
3.2 Caractéristiques des signaux	49
3.3 Protocoles	51
3.3.1 Dissemblances	51

3.3.2	Estimation de grandeur	51
3.3.2.1	Agrément	52
3.3.2.2	Amortissement	52
3.3.2.3	Brillance	52
3.4	Sujets	52
3.5	Résultats	53
3.5.1	Dissemblances	53
3.5.1.1	Dimension 1 : Amortissement de la structure, CGS et durée des signaux et brillance des sons	55
3.5.1.2	Dimension 2 : Paramètres de l'excitation, sonie spéci- fique dans le Bark 3 et tonalité des sons dans la partie résonante	59
3.5.1.3	Dimension 3 : paramètres de l'excitation, acuité et brillance de la partie transitoire des sons	62
3.5.2	Agrément	62
3.5.2.1	Effet de la variation de l'amortissement sur l'agrément	63
3.5.2.2	Effet de la variation de la durée et du lieu d'impact sur l'agrément	64
3.6	Conclusion	66
4	Perception des sons de plaques d'épaisseurs variables	67
4.1	Modèle pour une plaque d'épaisseur variable	68
4.2	Similarité entre sons de plaques d'épaisseur variable et sons de plaques d'épaisseur constante	70
4.2.1	Sons de l'étude	70
4.2.2	Sujets	71
4.2.3	Protocole	71
4.2.4	Résultats	72
4.2.5	Condition d'existence d'une épaisseur équivalente. Critère de dissemblance : timbre	74
4.2.6	Détermination de la valeur d'épaisseur équivalente. Critère d'équi- valence : la hauteur tonale	78
4.2.6.1	Influence du premier partiel	79
4.2.7	Conclusion	79
4.3	Appariement de hauteur tonale des sons de plaques	80
4.3.1	Sujets	80
4.3.2	Sons	80
4.3.3	Procédure	82
4.3.4	Conversion des résultats	82
4.3.5	Résultats	84
4.3.6	Discussion	87
4.4	Synthèse des résultats	88
4.5	Conclusion et perspectives	89

5	Comparaison objective et perceptive de signaux enregistrés et synthétisés	91
5.1	Objectif : minimiser des différences perceptives	91
5.2	Expérience préliminaire : choix du type d'excitation	93
5.3	Réalisation expérimentale	94
5.4	Caractéristiques des signaux enregistrés	98
5.4.1	Normalisation des signaux	98
5.4.2	Caractéristiques des signaux de pression enregistrés	99
5.4.2.1	Analyse temporelle	99
5.4.2.2	Analyse spectrale	100
5.4.2.3	Analyse du niveau de pression par bandes critiques	100
5.4.2.4	Analyse temps-fréquence "sensorielle"	102
5.5	Recalage des paramètres de la plaque	103
5.5.1	Amortissement interne de la plaque	103
5.5.2	Epaisseur	106
5.6	Différences objectives	108
5.6.1	Différences entre les composantes spectrales	108
5.6.2	Différences entre les enveloppes temporelles	109
5.6.3	Différences de niveau sonore à chaque composante spectrale	113
5.6.4	Discussion	114
5.6.5	Conclusion	115
5.7	Dissemblances perceptives	117
5.7.1	Détermination du domaine fréquentiel à prendre en compte pour la synthèse	117
5.7.1.1	Sujets	117
5.7.1.2	Sons	118
5.7.1.3	Protocole	118
5.7.1.4	Résultats et interprétation	118
5.7.1.5	Prédiction du domaine audible	121
5.7.1.6	Conclusions	122
5.7.2	Identification des valeurs des paramètres minimisant les dissemblances perceptives	123
5.7.2.1	Sujets	123
5.7.2.2	Sons	123
5.7.2.3	Procédure	125
5.7.2.4	Résultats et interprétation	125
	Partie transitoire	127
	Partie intermédiaire	127
	Partie amortie	129
	Signal complet	131
5.7.2.5	Identification des caractéristiques du son enregistré	135
5.7.3	Conclusions	137
5.8	Conclusion générale et perspectives	138
	Conclusion	141

Annexes	149
A Modèle de sonie	151
B Bandes critiques approchées	153
C Matériel utilisé pour les tests psychoacoustiques	155
D Ebouli des contraintes pour les différentes études	157
E Appariement de hauteur tonale par la méthode adaptative	159
E.1 Sujets	159
E.2 Sons	159
E.3 Procédure	159
E.4 Résultats	160
E.5 Conclusions	162
F Logiciel d'expertise acoustique	165
G Fréquences de résonance	167
H Tests préliminaires entre sons enregistrés et sons synthétisés	169
H.1 Sujets	169
H.2 Sons	169
H.3 Protocole	170
H.4 Résultats	170
H.5 Interprétation	171
H.6 Conclusion	173
I Différences de niveau entre sons enregistrés et sons synthétisés	175
J Comparaison perceptive entre son enregistré et sons synthésés : influence des fluctuations de niveau	181

Introduction

Les études psychoacoustiques sont en plein essor depuis quelques années notamment pour modifier/améliorer la qualité des sons dans le milieu industriel. Il est vrai que les industriels doivent respecter les normes mais ils ne s'en contentent plus. Désormais, ils se préoccupent du confort acoustique des sons rayonnés par leurs produits afin de mieux les commercialiser. C'est le cas des constructeurs d'automobiles. Par exemple, le niveau sonore maximum autorisé au passage d'un véhicule léger roulant à 50 km/h, à 7,5 mètres est de 74 dBA [1], niveau que les constructeurs savent tous respecter. En revanche, le confort acoustique à l'intérieur du véhicule est travaillé de façon à ce que l'automobiliste se sente à l'aise ou en sécurité. C'est ainsi que les concepteurs vont placer dans l'habitacle des absorbants ou autres matériaux qui modifieront les différents signaux de façon à ce qu'ils soient le plus agréables possible. C'est le cas également du bruit de claquement de portière ; une personne sera tentée d'acheter une voiture dont le timbre du son de claquement de portière est agréable plutôt qu'une voiture dont le son de claquement est distordu. Dans ces aspects de la qualité sonore il ne s'agit pas de réduire le bruit à son émission mais il s'agit de le modifier de façon à ce qu'il soit agréable.

L'utilisation d'outils psychoacoustiques est nécessaire dans les études dont le but est de réduire les nuisances sonores. Prenons l'exemple du contrôle actif. L'intérêt de ces études est de réduire le niveau des composantes spectrales des signaux sonores responsables de la gêne produite. Réduire le niveau de ces composantes de quelques décibels pourrait sembler suffisant. Cependant, si c'est seulement le niveau des composantes basses fréquences qui est diminué un autre effet se produit : la brillance des sons augmente entraînant une augmentation de la gêne. Cette réduction de niveau engendre ainsi une incohérence au niveau perceptif. C'est ce que montrent Canévet et Mangiante [2] dans l'étude de bruits d'avions filtrés à basse fréquence. Les signaux filtrés à basse fréquence avaient des niveaux moins forts que ceux non filtrés. Néanmoins, leur acuité était plus élevée que ceux non filtrés ce qui laisse supposer qu'ils sont plus gênants. Powell et Sullivan [3] ont mené des mesures de gêne plus précises puisqu'ils ont testé l'efficacité du contrôle actif de bruits en menant des tests de préférence. Les outils psychoacoustiques sont désormais nécessaires afin de pouvoir résoudre les problèmes de diminution de gêne ou d'amélioration de la qualité sonore à l'aide de tests perceptifs.

La psychomécanique est une discipline naissante. Les études psychomécaniques consistent globalement à comprendre les effets perceptifs de la variation de paramètres de structures rayonnant les sons. Jusqu'à présent, les études portaient essentiellement sur

des sons de barres ou de plaques. Une description plus précise sera donnée dans le chapitre 1.

Pourquoi mène-t-on des études psychomécaniques ? Les intérêts sont multiples. Nous pouvons en citer deux. Tout d'abord, dans le but d'améliorer la qualité sonore des signaux en modifiant les caractéristiques de la structure. Plutôt que de réduire le niveau des sons par des processus actifs ou passifs, il est plus intéressant (peut-être moins onéreux) d'améliorer la qualité du signal sonore en agissant sur la structure elle-même. Le second intérêt est de pouvoir, dans les logiciels de prévision, simplifier la modélisation du rayonnement de structures en se basant sur des critères perceptifs. Le but serait de substituer à une structure complexe, une autre plus simple (d'un autre matériau ou d'une autre géométrie) dont le signal rayonné serait similaire d'un point de vue perceptif. D'autre part, dans la modélisation des modes de vibrations d'une structure il n'est peut être pas nécessaire de chercher une précision très fine pour certains modes si les fréquences correspondantes ne sont pas audibles à cause des effets de masquage.

Nos études portent sur la psychomécanique des sons transitoires rayonnés par des plaques. Elles consistent essentiellement à résoudre des problèmes de modélisation pour le calcul de sons rayonnés par des plaques. Tout d'abord, le problème de la simplification de la modélisation de la géométrie d'une plaque en se basant sur des critères perceptifs est abordé. Ensuite, le recalage de paramètres du modèle afin de synthétiser au mieux un son enregistré est déterminé sur des critères perceptifs. Enfin, des aspects plus qualitatifs des sons (agrément) sont également abordés.

Ce document comporte cinq chapitres. Le premier est un état de l'art de la psychomécanique. Il comporte également une présentation des indices psychoacoustiques des sons étudiés : la sonie des sons transitoires, la hauteur tonale des sons complexes inharmoniques, le timbre ainsi que les fluctuations de niveau. Le second chapitre donne les principales étapes de calcul qui permettent de synthétiser les sons à l'aide de la méthode des modes de résonance. Nous y développons également l'effet de la variation des paramètres de la structure et de l'excitation sur le signal sonore rayonné. Notre travail porte sur le cas d'une plaque en acier bafflée, encastrée et immergée dans un fluide considéré comme parfait (air). La plaque est excitée par une force impulsionnelle de durée finie menant au rayonnement de sons transitoires. Dans ce document, nous considérerons que ces signaux peuvent se décomposer en deux ou trois parties suivant leur durée. Le rôle de la partie initiale que nous nommerons par la suite "partie transitoire" sera mis en évidence. Cette partie portera sur des durées différentes (100 ou 150 ms) variant suivant les signaux. Les trois derniers chapitres décrivent chacun une étude qui tente de résoudre un problème donné. Tout d'abord, le troisième chapitre pose le problème suivant : quel est l'effet perceptif de la variation de paramètres de la plaque et de l'excitation sur la perception des sons rayonnés, en terme de similarité et d'agrément ? Ces trois paramètres sont : l'amortissement de la structure, le lieu d'excitation et la durée d'impact. Ensuite, le quatrième chapitre pose le problème de la simplification de la modélisation d'une plaque d'épaisseur variable par une plaque d'épaisseur constante sur des critères perceptifs. Enfin, le dernier chapitre concerne le problème de la comparaison objective et perceptive de sons enregistrés et synthétisés de plaques. Pour ce problème, nous tenterons de répondre

à la question suivante : comment recalibrer les paramètres des sons de synthèse de façon à minimiser les différences perçues entre sons enregistrés et sons calculés ?

Chapitre 1

Etat de l'art

La psychomécanique des sons transitoires rayonnés par des plaques pose deux interrogations : comment définit-on la psychomécanique ? Comment perçoit-on les sons transitoires ? C'est pourquoi ce chapitre présente un état de l'art des études se rapportant à la psychomécanique ainsi que celui des indices psychoacoustiques des sons transitoires.

Quelle est la définition de la psychomécanique ?

Dans le domaine de la linguistique, il en existe une alors que dans l'acoustique elle reste informelle.

La psychomécanique du langage constitue une théorie établie par Gustave Guillaume [4] au milieu du 20^{ième} siècle. C'est "la science des mécanismes fondamentaux de la pensée commune qui interviennent dans la genèse de la langue, conçue comme le système des représentations à partir desquelles il est possible, par la médiation de signes appropriés, de produire des actes de langage et d'émettre des discours". La définition de la psychomécanique dans le domaine de l'acoustique est bien sûr très éloignée de celle de la linguistique. Lorsque le mot psychomécanique a été utilisé pour les études acoustiques, la définition linguistique n'était pas connue des acousticiens.

Depuis le début des années 90, des recherches de plus en plus nombreuses portent sur la perception de sons rayonnés par des structures vibrantes que certains auteurs appellent aussi "structures simples". En fait, il s'agit souvent de structures dont on connaît le comportement mécanique et dont on sait définir le rayonnement acoustique puisque ces études portent essentiellement sur des sons de synthèse. McAdams [5] fut le premier auteur à emprunter le mot psychomécanique pour définir ces études acoustiques. Il a en effet publié des résultats sur l'effet de la variation des propriétés géométriques et mécaniques de barres ou de plaques sur la perception sonore de leur rayonnement. C'est ce qu'il a nommé "the psychomechanics of sound sources". Une étude psychomécanique est une étude perceptive portant sur des sons rayonnés par des structures dont on fait varier les propriétés géométriques ou mécaniques. La première partie du mot, "psycho", a été emprunté au mot psychoacoustique et la seconde "mécanique" fait allusion à l'aspect mécanique du problème puisque les variables étaient, pour l'étude de McAdams, des variables mécaniques (amortissement par exemple).

Notre travail de recherche a la difficulté de porter sur la perception de sons rayonnés par des plaques excitées par une force ponctuelle de courte durée. Les sons rayonnés

sont donc des sons transitoires, complexes et inharmoniques.

Ce chapitre comporte deux parties. Tout d'abord, afin d'apporter des éléments qui peuvent étayer la psychomécanique, la première partie propose un recensement de quelques études sur la perception des sons rayonnés par des structures dont les propriétés mécaniques et géométriques sont modifiées. Cette partie permettra de répondre aux interrogations suivantes :

- Comment est perçu l'effet de la variation des paramètres de la structure ou de l'excitation ?
- Peut-on reconnaître la géométrie ou le matériau de la source rayonnant le son ?

La seconde partie porte sur les indices psychoacoustiques des sons transitoires complexes et inharmoniques.

1.1 Effets perceptifs de la variation de paramètres d'une structure

Ce thème de recherche est de plus en plus traité soit dans des perspectives vibroacoustiques (comprendre l'effet de certains paramètres dans le but de simplifier leur modélisation), soit pour étudier la qualité des sons, soit pour tester la capacité d'auditeur à reconnaître les sources.

Les études recensées sont regroupées en deux parties. La première concerne les études qui mettent en évidence les paramètres acoustiques et perceptifs résultant de la variation de paramètres. La seconde regroupe les études dont le but est de déterminer s'il est possible de reconnaître la géométrie ou le matériau de structures soumises à une excitation, en ayant uniquement l'information sonore.

1.1.1 Paramètres acoustiques et perceptifs résultant de la variation de paramètres mécaniques ou géométriques

Freed [6] compte parmi les premiers auteurs à étudier l'effet de la variation de paramètres géométriques d'une structure sur la perception du son rayonné. Les structures étudiées étaient des plats métalliques en aluminium ou en cuivre de contenances différentes et frappées par un maillet constitué de différents matériaux. Les sons enregistrés ont fait l'objet de tests perceptifs. La consigne était d'évaluer la dureté des maillets selon une échelle unidimensionnelle dont les deux extrémités étaient nommées "pas dur" et "très dur". Les résultats montrent que la taille de la structure n'influait pas les jugements. Freed a également montré que parmi quatre paramètres du timbre définis sur les 325 premières millisecondes de signal, les jugements de dureté étaient liés essentiellement au TWA (time-weighted average) du centre de gravité spectral (CGS) ; ce paramètre, exprimé en secondes, est une moyenne temporelle pondérée de la courbe décrivant l'évolution temporelle du centre de gravité spectral. Plus la valeur est faible, plus la sensation de dureté est élevée. Il a ainsi mis en évidence l'influence d'un paramètre spectro-temporel du timbre relatant l'évolution temporelle de la brillance des signaux pour une tâche d'identification de dureté de matériau.

McAdams et Coll. [7] ont mené une étude psychomécanique des sons rayonnés par des barres. Les sons étaient issus d'un programme de synthèse sonore, basé sur un modèle physique de barres, qui simulait des sons de barres frappées par un maillet. Leur étude se décomposait en deux expériences. La première portait sur une barre à section constante et la seconde sur une barre à section variable.

Dans la première expérience, les deux variables étaient mécaniques puisqu'il s'agissait de l'amortissement viscoélastique et de la densité volumique du matériau. La géométrie des barres était constante. Les sons égalisés en sonie, ont fait l'objet d'un test de dissemblance, puis une analyse multidimensionnelle leur a permis de placer les sons dans un espace perceptif à deux dimensions. La dimension 1 était liée au timbre, la seconde s'identifiait à la hauteur. Ils ont pu établir une corrélation entre la dimension 1 et la pente correspondant à la décroissance temporelle du centre de gravité spectral ($Slope_{CGS}$) des signaux. Cette dimension était également liée à l'amortissement. Quant à la dimension 2, elle était liée à la fréquence du premier partiel et à la densité du matériau.

Dans la seconde expérience, pour observer davantage l'effet de la hauteur tonale sur les jugements de dissemblance, ils ont modifié la longueur de la barre de façon à modifier la valeur de la fréquence fondamentale (f_1). L'amortissement avait également été modifié de façon à avoir la même variation perçue d'amortissement que dans l'expérience 1. Deux jeux de barres ont été testés : le premier portait sur des sons plutôt aigus, le second avec des barres plus longues portait sur des sons plus graves. Chaque groupe de sons a été soumis à un test de dissemblance puis à une analyse multidimensionnelle. Deux dimensions ressortent de ces deux analyses. Pour le jeu de barres correspondant aux sons les plus graves, les résultats sont similaires à ceux obtenus dans la première expérience : la dimension 1 évoquait une différence de timbre entre les sons alors que la seconde évoquait celle de hauteur tonale. La dimension 1 était liée à l'amortissement et à une combinaison du centre de gravité spectral et du $Slope_{CGS}$. La dimension 2 était corrélée à la fréquence fondamentale. En ce qui concerne les sons les plus aigus, la dimension 1 était également liée au timbre des sons. Cependant, les paramètres acoustiques permettant d'expliquer ces différences étaient différents de ceux mis en évidence dans les expériences précédentes. La dimension 1 était corrélée à la combinaison d'une durée équivalente E_{3dB} (correspondant au temps que met le signal pour décroître de 3dB) et à un coefficient de décroissance α (pente du niveau en fonction du temps après que le signal ait atteint le maximum de niveau). Cette dimension était également liée à l'amortissement. La seconde dimension était corrélée à la fréquence fondamentale de même que dans les expériences précédentes.

McAdams et Coll. ont ainsi relié les paramètres mécaniques de la barre (longueur, amortissement et densité du matériau), les paramètres acoustiques (centre de gravité spectral, coefficients décrivant les décroissances temporelles de niveau, fréquence fondamentale...) et les paramètres perceptifs (timbre et hauteur tonale).

Roussarie [8] a travaillé pendant sa thèse sur des sons rayonnés par des plaques. Il synthétisait des sons de plaque excitée par un maillet (assimilé à une sphère). Pour cette étude, il a modifié deux paramètres mécaniques de la plaque : un paramètre d'amortissement et un paramètre d'élasticité. En faisant varier les valeurs d'amortissement viscoélastique et d'élasticité du matériau, il a pu obtenir des matériaux

"hybrides" permettant de passer d'une plaque en verre à une plaque en aluminium. Une première expérience concernait les jugements de dissemblance. Des sons ont été calculés pour l'excitation par un maillet en bois, puis d'autres pour l'excitation par un maillet en caoutchouc. L'analyse multidimensionnelle a mis en évidence deux dimensions pour chaque type de maillet. La dimension 1, pour les deux types d'excitations, était liée au timbre montrant ainsi la sensibilité de l'auditeur à l'amortissement. Cette dimension était liée au centre de gravité spectral des sons. La dimension 2, associée à la hauteur, était corrélée à la fréquence du premier partiel. Les résultats pour chaque type d'excitation sont semblables, ce qui montre que les auditeurs ont jugé les sons indépendamment du type d'excitation.

La seconde expérience est présentée au paragraphe 1.1.2.1.

Meunier et Coll. [9] ont présenté une étude couplée de vibroacoustique et psychoacoustique de sons émis par des structures vibrantes. Il s'agissait pour eux d'étudier la qualité des sons issus de plaques. Les sons différaient par leurs caractéristiques concernant les modes de vibration (type d'excitation, géométrie et accélération sur la plaque). Les sons synthétisés ont été testés au cours de deux expériences. La première expérience était un test de désagrément qui consistait à demander aux auditeurs de juger le désagrément produit par les sons par une estimation directe. Les résultats du test ont montré que le désagrément était proportionnel à la sonie ; plus la sonie était élevée, plus le son était désagréable. Afin de pouvoir isoler l'influence de la sonie sur le désagrément, chaque signal a été normalisé de façon à avoir tous la même sonie. Ces sons ont alors été soumis au test de désagrément. Les auteurs ont pu constater que le désagrément était dans ce cas corrélé à l'acuité ; plus les sons étaient brillants, plus la sensation de désagrément était élevée. Pour la seconde expérience, les sons étaient à niveau de sonie égal. Le but était d'évaluer la similarité entre les sons présentés par paires. Les résultats d'une analyse multidimensionnelle ont permis de placer les différents sons dans un espace perceptif à trois dimensions. La dimension 1 représentait la hauteur des sons ; sur cette dimension les sons étaient classés en fonction de leur fréquence fondamentale. La dimension 2 était reliée au timbre. Cet axe était relié à un équilibre spectral qui distinguait les différences de niveau entre l'amplitude de la fréquence fondamentale et celles des harmoniques. Cette dimension était corrélée négativement aux jugements de préférence et à l'acuité. Selon les auteurs, la dimension 3 était corrélée à la taille des différentes surfaces. Leur étude a montré qu'il y avait un lien entre le désagrément (ou la préférence) des sons de structures vibrantes et les attributs psychoacoustiques tels que la sonie, le timbre ou la hauteur.

Faure et Marquis-Favre [10] ont étudié la transmission de bruits blancs à travers une plaque appuyée en acier. Leur étude portait, tant d'un point de vue physique que perceptif, sur l'effet de la modification de cinq paramètres : l'amortissement, le module d'Young, la densité volumique et le coefficient de Poisson du matériau puis l'épaisseur de la plaque. Deux séries de tests perceptifs ont été menées pour comprendre l'effet de la variation de chaque paramètre indépendamment les uns des autres : des tests de préférence et des tests de dissemblance suivis d'une analyse multidimensionnelle. Les plages de variation des paramètres mécaniques ont été choisies de façon à ce qu'elles correspondent à différents aciers.

Pour l'étude de l'amortissement, une dimension résultait de l'analyse multidimensionnelle. Elle était liée à la sonie des sons, les sons les plus amortis étant perçus comme moins forts. Les résultats pour le test de préférence étaient également corrélés à la sonie : les sons les plus amortis étaient perçus moins forts et étaient donc moins gênants.

Pour l'étude des autres paramètres, il est important de rappeler que modifier le module d'Young E , la densité volumique ρ_p et le coefficient de Poisson ν du matériau ou l'épaisseur h de la plaque renvient à modifier un facteur dont dépendent les fréquences propres f_{mn} de la plaque. Pour une plaque appuyée de longueur a et de largeur b , l'expression des fréquences propres est la suivante :

$$f_{mn} = \frac{h}{2\pi} \times \left(\frac{E}{12\rho_p(1-\nu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

Les fréquences propres de la plaque sont les composantes spectrales du signal. C'est pourquoi augmenter ou diminuer leur valeur revient à décaler chaque composante spectrale vers les graves ou les aigus.

Pour les expériences sur le coefficient de Poisson et de la densité du matériau, les variations choisies influençaient très peu les fréquences propres de la plaque si bien que les différences entre les sons n'étaient pas (ou peu) perceptibles. En revanche, ce n'était pas le cas du module d'Young. Une dimension perceptive liée à ce paramètre a été identifiée. Elle était corrélée au logarithme d'une métrique nommée NFD (Natural Frequency Deviation) traduisant le décalage des fréquences propres de la plaque. Les tests de préférence ont révélé que les sons correspondant à des valeurs du module d'Young faibles étaient préférés. Si l'on se réfère à l'expression 1.1, on constate qu'une diminution de sa valeur mène à un décalage du spectre vers les graves ce qui indique que les sons préférés étaient les plus graves.

Le dernier paramètre, l'épaisseur, a été modifié dans deux mesures différentes menant à deux groupes de sons traités indépendamment. Chaque groupe correspondait à un rapport d'épaisseur maximale sur épaisseur minimale de 3 et de 20. Pour chaque analyse une dimension a été identifiée. Dans le cas où le rapport est de 3, Faure et Marquis-Favre ont montré que le paramètre expliquant les différences était le logarithme de NFD. En revanche, dans le cas où le rapport était de 20, c'était essentiellement la sonie qui expliquait cette dimension. De même, les préférences étaient essentiellement corrélées au logarithme de NFD dans le cas du rapport 3 et à la sonie dans le cas du rapport 20, les différences de niveau devenaient plus saillantes avec un rapport d'épaisseur de 20.

Faure [11] a réalisé d'autres expériences avec des sons transmis à travers des plaques cette fois-ci en verre dont il avait modifié le module d'Young, l'amortissement et l'épaisseur.

Pour l'étude de l'amortissement, les résultats étaient similaires à ceux de l'acier. La dimension perceptive ainsi que les scores de préférence étaient corrélés à la sonie. Les sons les plus amortis étaient également les sons préférés.

Pour l'étude du module d'Young, la dimension perceptive était corrélée au logarithme de NFD. En revanche, pour les tests de préférence, il a obtenu deux groupes de sujets portant des jugements opposés. Un groupe préférait les sons les plus graves bien

qu'ayant un niveau plus fort alors que le second groupe préférerait les sons de niveaux plus faibles bien qu'étant plus aigus. Dans les deux cas, les résultats sont corrélés au paramètre de décalage des fréquences naturelles de façon positive ou négative suivant le groupe.

Pour les variations d'épaisseur (variant d'un facteur inférieur à 4), les résultats obtenus étaient très similaires à ceux concernant la plaque en acier dont l'épaisseur variait d'un facteur 3.

Faure [11] a également étudié l'influence des conditions aux limites sur la perception de bruits roses transmis à travers des vitrages. Son travail portait sur deux groupes de sons associés à deux cas différents : conditions aux limites viscoélastiques uniformes (encastree, appuyée et libre) et non uniformes (cales ponctuelles ou continues et joint d'étanchéité souple ou rigide). La modification des conditions aux limites uniformes et non uniformes engendre une modification du spectre du son transmis à travers la paroi et une modification des fréquences propres de la plaque. Pour chaque groupe de sons, des tests de préférence et de dissemblance ont été menés. Dans le cas des conditions uniformes, deux dimensions expliquaient les dissemblances. La première était corrélée à $\log(NFD)$ traduisant le décalage des fréquences propres et la seconde était corrélée à la sonie traduisant la modification du spectre du son transmis. Les scores de préférence étaient essentiellement liés à la sonie. Dans le cas des conditions non uniformes, deux dimensions ont également été identifiées : la première était liée à la sonie et la seconde à la fréquence du premier mode. En ce qui concerne les jugements de préférence, ils étaient corrélés à une combinaison de ces deux paramètres.

Trollé et Coll. [12] ont également étudié la perception de sons transmis à travers des plaques. Dans leur approche, ils ont utilisé des sons enregistrés d'avion ou de voiture. Puis, ils ont simulé la transmission de ces sons à travers des plaques en verres dont les conditions aux limites étaient les variables de l'étude. La plaque était encastree à l'aide de joints soient continus soient localisés, constitués de différents matériaux. Des tests de préférence et de similarité ont été entrepris sur les deux groupes de sons correspondant aux deux signaux enregistrés. L'analyse multidimensionnelle révélait que :

- dans le cas du bruit d'avion, la première et la seconde dimension étaient respectivement corrélées à la sonie spécifique dans la 2^{nde} et la 5^{ième} bande de Bark ; les scores de préférence étaient corrélés à la sonie spécifique dans la 2^{nde} bande de Bark ;
- dans le cas du bruit de voiture, la seule dimension ainsi que les scores de préférence étaient corrélés à une combinaison d'acuité et de sonie.

Les résultats obtenus étaient différents suivant les sons. Dans le cas de cette étude, les différences de conditions aux limites engendrent une modification du spectre du son transmis entre 50 et 500 Hz. Les bandes de Bark 2 et 5 étaient essentiellement concernées par la modification des conditions aux limites. C'est pourquoi, dans le cas du bruit d'avion dont la composante maximale est autour de 700 Hz, l'énergie dans ces deux bandes entraine en compte dans les jugements de dissemblance. En revanche, ce n'était pas le cas du bruit de trafic dont la composante maximale se trouve autour de 150 Hz. En dessous de cette fréquence, une modification de ces conditions aux limites entraîne une modification du niveau. C'est pourquoi des différences de sonie

et d'acuité étaient perceptibles.

Hamzaoui et Coll. [13] ont également étudié les sons transmis à travers des parois d'un point de vue expérimental (avec des sons enregistrés) et théorique (avec des sons de synthèse). Dans le premier cas, les plaques étaient composées de différents matériaux et de différentes épaisseurs. Dans le second, les coefficients d'amortissement de la plaque ainsi que les conditions aux limites étaient également modifiées. Dans les deux cas, ils ont montré que les scores de préférence étaient liés à la sonie et à l'amortissement, les sons amortis étant préférés.

Guibert [14] a travaillé sur le rayonnement d'une structure plus complexe, à savoir une plaque vibrante couplée à une cavité et excitée par une force impulsionnelle. Les variables de son étude étaient : le point d'impact, le coefficient de réflexion des parois de la cavité, la position du point d'écoute et le nombre de sources images utilisées pour modéliser la cavité. Elle a mené un test de dissemblance permettant d'identifier trois dimensions. La première dimension était liée à la hauteur tonale, la seconde à la brillance des sons et la troisième à la rapidité de battements présents dans le signal.

1.1.2 Reconnaissance de sources

Dans ce paragraphe, nous décrivons quelques études qui avaient pour but de tester la capacité d'auditeurs à reconnaître les structures émettant les sons à partir de la seule écoute des sons.

Deux groupes d'études sont distingués. Le premier concerne la reconnaissance de matériaux et le second l'identification de la géométrie des sources.

1.1.2.1 Matériau

Lutfi et Oh [15] ont consacré une étude à la discrimination auditive de changement de matériau constituant des barres encastrées à une extrémité et frappées à l'autre extrémité libre. Ils ont simulé des sons de barres de section circulaire, dont la géométrie et l'excitation étaient fixes. Les deux variables de l'expérience étaient : la masse volumique et l'élasticité du matériau. Ainsi, ils ont travaillé sur des sons simulés de barres de divers matériaux, des alliages (cristal, bois, bronze, acier, quartz...). Les extrémités du plan (densité, élasticité) étaient le fer et le verre, appelés matériaux cibles. Trois paramètres acoustiques étaient associés à chaque son et traduisaient le changement de matériau : la fréquence, l'amplitude et le taux de décroissance de chaque partiel. Le premier partiel a été tronqué par filtrage car il restait audible pendant plusieurs secondes. Le signal ne comportait alors que 3 partiels audibles. Le test utilisé pour l'expérience était un test de jugement à choix forcé. Les sujets devaient désigner celui des deux sons présentés par paires qui provenait d'une barre en fer dans un premier test, puis celui qui provenait d'une barre en verre dans un second. Les auteurs ont pu constater que les sujets avaient discriminé les matériaux relativement à la fréquence du second partiel (qui est dans ce cas le premier audible). En revanche, le niveau et le temps de décroissance de chacun des partiels n'ont pas été pris en compte par les auditeurs pendant les jugements.

Roussarie [8] a mené une seconde expérience sur la perception des sons de plaque. Cette expérience portait des sons de plaques hybrides (dont le matériau variait du verre à l'aluminium). Son expérience avait pour objectif de tester la capacité des sujets à distinguer les matériaux. La tâche d'identification était présentée sous forme d'une classification à choix forcé. Chaque son était présenté plusieurs fois au sujet. L'auditeur devait indiquer si le son provenait d'une plaque en aluminium ou en verre en cliquant sur un bouton. Les auditeurs ont répondu de façon identique indépendamment de l'excitateur et ont basé leurs jugements sur le timbre des stimuli. Pour cette expérience, le timbre est un attribut perceptif qui correspond à l'amortissement. Ces jugements étaient indépendants des paramètres qui décrivaient la hauteur. Roussarie a pu constater que le passage entre le choix du verre et de l'aluminium n'était pas linéaire. Il a identifié le point d'inflexion qui représente le point critique pour lequel les sujets ont perçu un changement pour le choix du matériau.

Giordanno [16] a testé la capacité d'auditeurs à reconnaître le matériau d'une plaque en se basant seulement sur l'écoute de sons enregistrés. Il a mené trois expériences. Chacune portait sur des sons de plaque suspendue excitée par une bille. La première expérience portait sur des sons faiblement amortis, la seconde sur des sons amortis et la dernière portait sur des sons avec différentes excitations. Les variables de l'étude étaient :

- le matériau de la plaque pour les trois expériences : métal, plastique, bois, verre,
- la longueur et l'épaisseur de la plaque pour les trois expériences,
- le matériau de l'excitateur pour la dernière expérience : métal, plastique, bois et verre.

Il a mené des tests à choix forcé où les sujets devaient choisir parmi les quatre matériaux proposés quel était celui qui correspondait à la plaque qui émettait le son. Les résultats étaient assez similaires pour les trois expériences. Il y avait une confusion pour les plaques en métal et en verre d'une part et pour les plaques en bois et en plastique d'autre part. Cette confusion dépendait essentiellement de la surface des plaques. En fait, les auditeurs ont basé leur choix sur la hauteur des sons fortement influencée par la première composante spectrale. Deux plaques de matériaux et de géométrie différentes pouvaient avoir une hauteur similaire entraînant une confusion dans les jugements. Il a également montré que le changement du matériau de l'excitation dans la dernière expérience ne modifiait guère ses conclusions.

1.1.2.2 Géométrie

Lakatos et Coll. [17] ont examiné la capacité des sujets à discriminer la forme géométrique de sources sonores. Ils ont enregistré des sons de barres suspendues, de différentes géométries, et frappées par un maillet. La section des barres rectangulaires était la variable de l'expérience. Des sons de barres en acier ont été soumis à un premier test et des sons de barres en bois ont été soumis à un second test. Les sons ont été égalisés en sonie. Dans les 5 minutes qui précédaient le test, les sujets se sont familiarisés avec les sons : ils ont pu frapper sur quelques barres avec un maillet et apprécier l'écoute. Les sujets avaient pour consigne d'identifier la forme de la source sonore en basant leurs jugements sur le timbre des signaux. Pour cela, les sons étaient

présentées par paires. À l'écran, deux paires de géométries de barres étaient tracées. Les deux paires étaient identiques excepté qu'elles étaient proposées dans un ordre opposé. Les deux propositions étaient alors réponse 1 : géométrie1-géométrie2 ou réponse 2 : géométrie2-géométrie1. Les sujets devaient déterminer à quel ordre visuel correspondaient les formes géométriques des sources sonores qu'ils écoutaient. Pour effectuer des mesures de dissemblances Lakatos et Coll. ont transformé ces résultats en distances. Ainsi, ils ont établi une matrice de dissemblances à partir de laquelle ils ont fait une analyse multidimensionnelle. Pour l'expérience avec les barres en métal, une solution à deux dimensions a été trouvée. La dimension 1 était liée au rapport largeur sur épaisseur. D'un point de vue acoustique, la dimension 1 était liée au rapport des fréquences des modes de la barre. La dimension 2 était liée au centre de gravité spectral calculé sur la portion d'attaque du signal. Pour l'expérience avec les barres en bois, la solution à une dimension était la plus appropriée. Cette dimension était liée au rapport largeur sur épaisseur. Ici, cette dimension est aussi liée au rapport des fréquences propres de la barre.

Houix [18] a travaillé dans la continuité des travaux de Lakatos et Coll. [17] en traitant le problème de représentation des sources sonores. Il a mené 4 expériences portant chacune sur un groupe de sons :

- le groupe 1 était composé des sons enregistrés de barres de différentes largeurs et épaisseurs correspondant à ceux de l'étude de Lakatos et Coll. ; au total, six barres ont été frappées par un maillet en différents points d'impact, favorisant ainsi l'excitation de différents modes (flexion ou torsion) ;
- le second groupe correspondait aux sons du groupe 1 synthétisés par modèle physique contenant l'information fréquentielle des modes de flexion et de torsion ;
- le troisième groupe était composé des sons de synthèse contenant seulement l'information fréquentielle des modes de flexion ;
- le dernier groupe était composé des sons de synthèse contenant seulement l'information fréquentielle des modes de torsion.

Houix voulait ainsi connaître l'apport des fréquences modales de flexion et de torsion dans la représentation de la section géométrique d'une barre. Le protocole pour les tests était le même que celui utilisé par Lakatos et Coll. et décrit dans le paragraphe précédent. Les analyses multidimensionnelles portant sur chaque groupe de sons ont montré que les dimensions des sons du groupe 1 (sons enregistrés) ne sont pas liées aux dimensions des sons du groupe 2 (sons de synthèse avec la condition flexion + torsion). Selon l'auteur, cette divergence de résultats peut provenir du fait qu'une information, présente dans les enregistrements mais pas dans les synthèses induirait des critères différents. D'autre part, cette divergence pouvait s'expliquer par les scores "de reconnaissance juste" qui étaient mauvais dans le cas des sons de synthèse. En revanche, les espaces propres à chaque condition flexion et torsion sont plus proches de l'espace des sons enregistrés. Selon l'auteur, l'information contenue dans les sons synthétisés, propre à ces modes particuliers est une source potentielle d'information pour effectuer la tâche d'appariement audiovisuelle. Houix a interprété les dimensions en terme de rapport d'épaisseur sur largeur, de rapport de fréquences correspondant aux modes particuliers de l'étude (flexion, torsion) ou en terme de centre de gravité spectral.

Houx [18] a également mené des expériences de classification de sources portant sur des sons enregistrés de six barres de différentes sections et excitées par un marteau à choc en différents points de la barre. Trois expériences ont été entreprises : classification orientée, non-orientée et contrainte. Les auditeurs visualisaient sur l'écran d'un ordinateur 30 "boîtes-sons" correspondant aux sons enregistrés. Chaque boîte pouvait être déplacée ou bien jouée de manière interactive sur l'écran pour former des classes de sons. Pour la classification non-orientée les sujets avaient pour consigne de regrouper les sons en fonction de leur similarité. Pour la classification orientée, les sons devaient être regroupés s'ils provenaient de la même barre. Enfin, pour la classification contrainte, les sujets devaient former six classes correspondant aux six barres. Le premier résultat, pour les trois expériences, est que les auditeurs n'ont pas regroupé les sons provenant d'une même barre. Des barres de géométries différentes et frappées en certains points produisaient un même effet perceptif si bien que les sujets pensaient que les sons provenaient de la même barre. Le critère perceptif utilisé par les sujets était la hauteur tonale. Dans l'ensemble, une classe de sons correspondait à une note de musique représentant la première fréquence modale des modes de flexion. Ensuite, les classes résultantes étaient globalement les mêmes pour les trois tests. Il résulte donc de ces expériences que les sujets n'ont pas réussi à regrouper les sons en fonction de la géométrie des barres quelle que soit la tâche de classification.

Lutfi [19] a étudié la détection auditive d'une portion creuse dans une barre à section circulaire. Il a étudié le cas d'une barre encastrée à une extrémité et libre à une autre. Il a étudié l'effet de la variation du rayon de la portion creuse pour des barres de longueur, de rayon de portion pleine, d'élasticité et de densité volumique différents. Ainsi, il a synthétisé des sons provenant de barres en acier, en bois, en aluminium creuses ou pleines. Il a étudié la variation de paramètres acoustiques sur les trois premiers partiels : le taux de décroissance, la fréquence et l'amplitude des différents partiels qui composaient le spectre. Les sons étudiés étaient présentés par paires. Chaque paire comprenait un son provenant d'une barre creuse et un autre provenant d'une barre pleine, constituée du même matériau et de longueur perturbée d'un coefficient ϵ . La tâche de l'auditeur était d'indiquer lequel des deux sons était issu d'une barre creuse. Les résultats indiquaient clairement que les stratégies de décision des auditeurs différaient lors des jugements. Deux groupes de sujets ont été distingués : ceux pour lesquels la fréquence fondamentale était le seul critère de jugement et ceux qui ont utilisé la fréquence fondamentale ainsi que le taux de décroissance du signal.

Kunkler Peck et Turvey [20] ont étudié la perception de la géométrie de plaques. Cette étude est analogue à celle de Lakatos et Coll. qui concernait les barres. Des plaques de même surface et de même poids ont été suspendues et frappées avec un pendule en acier lâché d'une hauteur constante. Les sons n'étaient ni enregistrés, ni synthétisés mais étaient entendus directement par les sujets. Seule la géométrie des surfaces de la plaque variait. Kunkler Peck et Turvey ont entrepris quatre tests perceptifs. Les deux premiers consistaient à évaluer la dimension des plaques rectangulaires frappées, en déplaçant un goujon horizontalement puis verticalement afin de dessiner la dimension

des plaques. Les résultats des deux premiers tests ont révélé que les sujets ont respecté une certaine proportionnalité entre la longueur et la largeur des plaques mais ont sous-estimé les dimensions. Les résultats étaient corrélés aux fréquences modales des plaques. Les plaques étaient en acier seulement dans un premier test puis en bois, en plexiglas et en acier dans le second. Les troisième et quatrième tests étaient des tests de discrimination de la forme de la plaque. Les sujets devaient indiquer oralement si la plaque frappée était triangulaire, rectangulaire ou circulaire. Les résultats de ces tests sont moins concluants. La réussite à la tâche d'identification était de 50% environ. Les auteurs n'ont pas établi de corrélation avec la physique du signal. Une analyse de variance indiquait tout de même que les résultats étaient significatifs.

Lutfi et Coll. [21] ont mené une étude comparative entre sons enregistrés et sons synthétisés rayonnés par différents objets (plaques, verres, barres...) excités par un maillet. Ils ont montré qu'il était difficile pour des auditeurs de reconnaître parmi des sons présentés par paires, chaque paire contenant un son enregistré et le son synthétisé respectivement, quel était le son enregistré. Ils ont également montré que les auditeurs avaient des difficultés à reconnaître visuellement (à l'aide de photos) les objets qui rayonnaient les sons qu'ils écoutaient.

Stoelinga et Coll. [22] ont étudié la perception des sons de synthèse simulant le rayonnement d'une balle de différents diamètres, rebondissant sur une plaque. Ils ont montré quelle était l'influence du coefficient de restitution (exprimant le rapport de la vitesse avant l'impact sur celle après l'impact) sur la perception de l'aspect naturel des sons ainsi que sur la perception de la taille de la balle. Les sujets ont essentiellement utilisé des indices spectraux pour les deux tâches. Houben et Coll. [23] ont également montré l'influence des indices spectraux pour une identification de grandeur et de vitesse de balle, de différents diamètres et roulant sur une plaque à différentes vitesses.

Grassi [24] a mené des expériences sur la perception de la taille de balles impactant une plaque. Une première expérience à choix forcé a été menée sur des sons rayonnés par deux plaques circulaires de différents diamètres. La variable de l'expérience était le diamètre des balles. Les auditeurs devaient indiquer parmi les deux sons d'une paire quel était celui qui correspondait à la balle la plus grosse. Les scores étaient excellents pour cette tâche bien que les sons aient été rayonnés par différentes plaques.

Pour la seconde expérience, portant sur les mêmes sons, les auditeurs devaient indiquer la taille des balles en modifiant le diamètre d'un cercle situé sur un écran. Le premier résultat était que les estimations ne correspondaient pas à la taille réelle des boules. En allant un peu plus dans le détail, dans le cas de la petite plaque, les diamètres étaient toujours sous-estimés. En revanche, pour la grande plaque, les diamètres étaient sous-estimés pour les petits diamètres et sur-estimés pour les grands diamètres. Par conséquent, les différences d'estimation (à diamètre de balle constant) pour les deux plaques étaient faibles pour des faibles diamètres mais bien plus élevés pour les grands diamètres. Les divergences de jugements s'expliquaient par le centroïde des sons menant à la confusion des jugements des auditeurs. Pour une grande balle, le centroïde était plus élevé dans le cas de la petite plaque que dans celui de la

grande alors que dans le cas de la plus petite balle, les centroïd étaient équivalents.

1.1.3 Synthèse et discussion

Le tableau 1.1 présente une synthèse des travaux présentés dans les deux paragraphes précédents. Dans l'ensemble, les structures étudiées étaient des plaques ou des barres souvent excitées par un maillet. Les auteurs ont fait varier le matériau ou la géométrie de la structure étudiée ou les caractéristiques de l'excitation. Les paramètres acoustiques liés à la variation des paramètres étaient essentiellement des indices spectraux. Les tests étaient des tests de similarité ou de préférence des sons d'une part, et des tests de discrimination ou de reconnaissance de matériaux des structures rayonnant les sons d'autre part. Les paramètres perceptifs identifiés étaient : la hauteur tonale, la sonie, les fluctuations de niveau, l'acuité et le timbre des sons.

Dans l'ensemble, les auteurs ont pu identifier les paramètres acoustiques et perceptifs résultant de la modification des paramètres mécaniques ou géométriques. Lorsque ce n'est pas le cas [14] [20], nous ne pouvons pas conclure quant à l'effet perceptif de la modification des paramètres.

Dans le cas de sons synthétisés, les auteurs ont fait généralement varier plusieurs paramètres simultanément, ce qui permet de mettre en évidence l'effet de la variation d'un couple de paramètres [7] [9] [14] [8] [18]. En revanche, d'autres auteurs [10] [11] ont choisi de faire varier un paramètre pour chaque étude, ce qui permet d'isoler l'influence d'un paramètre. Cette approche présente l'avantage de quantifier précisément l'effet d'un paramètre ; cependant, cela ne reflète pas la réalité par rapport à des sons de l'environnement. Dans ce cas, les auteurs ont obtenu des espaces perceptifs à une dimension lors de l'analyse des dissemblances, ce qui n'est pas surprenant. L'obtention de deux dimension, qui serait également possible, signifierait que la modification d'un paramètre engendrerait un double effet perceptif.

Pour certaines études, des dimensions perceptives n'ont pas pu être identifiées. C'est le cas, pour l'étude de la variation du coefficient de Poisson ou de la densité du matériau de plaques en acier transmettant un bruit [10]. Ce résultat n'est pas surprenant car les plages de variation des paramètres que les auteurs avaient choisies, bien qu'elles soient réalistes pour un acier, n'engendrait pas de forte modification des fréquences propres. Etant donné que la modification de ces paramètres engendrait essentiellement une modification des fréquences propres, les sons synthétisés étaient donc très similaires. Par conséquent, les différences étaient peu perceptibles et aucune dimension ne pouvait être déduite.

L'étude sur des matériaux hybrides [8] pourrait manquer de réalisme puisque ces matériaux n'existent pas. Cependant, ceci permet de mieux comprendre l'effet de l'amortissement et de la densité volumique du matériau pour une tâche de discrimination de matériau ce qui ne serait pas réalisable avec des sons enregistrés.

Une approche psychomécanique est très intéressante, pour la mise en évidence des modes prépondérants (flexion et/ou torsion) d'un point de vue perceptif pour une tâche de discrimination de géométrie [18] afin de synthétiser au mieux des sons de

barres. Bien que les résultats de cette étude n'aient pas été très concluants, cette démarche a l'avantage de proposer une solution afin d'améliorer la synthèse sonore.

Ces résultats apportent des éléments de réponses aux deux problèmes de départ.

- Le premier posait l'interrogation suivante : comment est perçu l'effet de la variation de paramètres géométriques ou mécaniques ? Nous constatons que dans la plupart des études les paramètres acoustiques et perceptifs traduisant l'effet de la variation de paramètres de la structure ou de l'excitation ont été identifiés (voir tableau 1.1).
- Le second problème était de savoir s'il est possible de reconnaître le matériau ou la géométrie de la structure rayonnant le son ? Ce n'est pas le cas pour les expériences de Houix [18], Grassi [24] et Giordanno [16]. Les deux derniers auteurs ont fait varier deux paramètres simultanément menant ainsi à une confusion dans les jugements.

Structures	Excitation	Variables (Paramètres mécaniques ou géométriques)	Paramètres acoustiques	Tests	Paramètres perceptifs	Références
Plats	Maillet	Matériau du maillet	TWA du CGS ^a	Evaluation de la dureté des maillets	Timbre	[6]
Barres	Maillet	Amortissement, densité volumique	$Slope_{CGS}, f_1, E_{3dB}, \alpha^b$	Similarité	Hauteur tonale, timbre	[7]
Plaques	Mécanique	Géométrie, excitation	1 ^{ière} fréquence, $\frac{L_{fond}}{L_{harm}}$	Similarité, désagrément	Sonie, acuité, hauteur tonale, timbre	[9]
Plaques	Bruit	Amortissement, module d'Young, coefficient de Poisson, épaisseur, conditions aux limites	NFD ^c , sonie spécifique, f_1	Similarité, préférence	Sonie, acuité	[10] [12]
Barres	Maillet	Matériau	Fréquence du 1 ^{ier} partiel audible	Discrimination de matériau	Hauteur tonale	[15]
Plaque + Cavité	Impulsion	Excitation, coefficient de réflexion	Non identifiés	Similarité	Brillance, fluctuations de niveau, hauteur tonale	[14]
Plaques	Maillet	Matériau	Non identifiés	Discrimination de matériau	Timbre	[8]
Barres	Maillet	Matériau	Fréquences modales, CGS	Reconnaissance de géométrie	Timbre, hauteur tonale	[17]
Barres	Maillet	Excitation, géométrie Excitation, géométrie	Fréquences modales, CGS	Reconnaissance de géométrie Classification de sources	Timbre, hauteur tonale Hauteur tonale	[18]
Barres	Maillet	Matériau	Fréquence du 1 ^{ier} partiel, taux de décroissance	Détection de portion creuse	Timbre, hauteur tonale	[19]
Plaques Plaques	Maillet Maillet	Géométrie Forme	Fréquences modales	Evaluation des dimensions Discrimination de la forme	Non identifiés	[20]
Plaques	Sphère	Diamètres des plaques et des balles	Centroïd	Evaluation du diamètre des balles	Timbre	[24]
Plaques	Bille	Matériau	Fréquence du 1 ^{ier} partiel	Discrimination du matériau	Hauteur tonale	[16]

TAB. 1.1 – Bilan des études psychomécaniques

^a défini à la p.18^b l'ensemble de ces paramètres sont définis à la p.19^c défini à la p.21

1.1.4 Définition de la psychomécanique

La démarche adoptée pour la majorité des études décrites dans les deux paragraphes précédents se retrouve généralement dans le schéma 1.1. Les études portent sur des structures (souvent de type barre ou plaque) soumises à des excitations mécaniques (maillet) ou acoustiques (bruits). Les variables des problèmes sont soit la géométrie de la structure (longueur, largeur de barres...) soit les caractéristiques du matériau (amortissement, module d'Young...), soit les caractéristiques de l'excitation (taille de la sphère frappant la structure), soit plusieurs de ces paramètres à la fois. Les paramètres géométriques ou mécaniques (les variables) sont associées à chaque structure ou excitation. Les structures excitées rayonnent des sons à partir desquels on peut calculer des paramètres acoustiques temporels et/ou spectraux (centre de gravité spectral, fréquences fondamentales, etc...). Ces sons sont soumis à des tests auditifs (similarité, agrément, classification) qui permettent d'identifier les critères perceptifs utilisés par les sujets pendant leurs jugements.

Trois types de connexions peuvent être établies entre les différents paramètres :

1. Des corrélations entre les paramètres mécaniques et/ou géométriques et les paramètres acoustiques ce qui fait l'objet d'une étude essentiellement vibroacoustique.
2. Des corrélations entre les paramètres acoustiques et les attributs perceptifs ce qui fait l'objet d'une étude psychoacoustique.
3. Des corrélations entre les paramètres mécaniques et/ou géométriques et les attributs perceptifs.

Au cours d'études psychomécaniques, les trois types de liens sont examinés afin de mieux comprendre l'effet de la variation des paramètres de la structure ou de l'excitation sur la perception du son rayonné. Les études de Houix [18], Grassi [24] et Giordanno [16] ont montré que pour des tâches d'identification ou de classification de sources, on ne peut pas établir directement de corrélation de type 3 sans tenir compte des corrélations de type 1 et 2. L'information acoustique semble primordiale lorsqu'il s'agit d'étudier la perception auditive de signaux.

Dans les travaux présentés dans ce document, les effets de la variation de paramètres géométriques ou mécaniques de la structure ou de l'excitation sur les paramètres acoustiques (liens de type 1) sont détaillés dans le chapitre 2. Les autres types de corrélations (2 et 3) sont mis en évidence dans les chapitres 4, 3, 5.

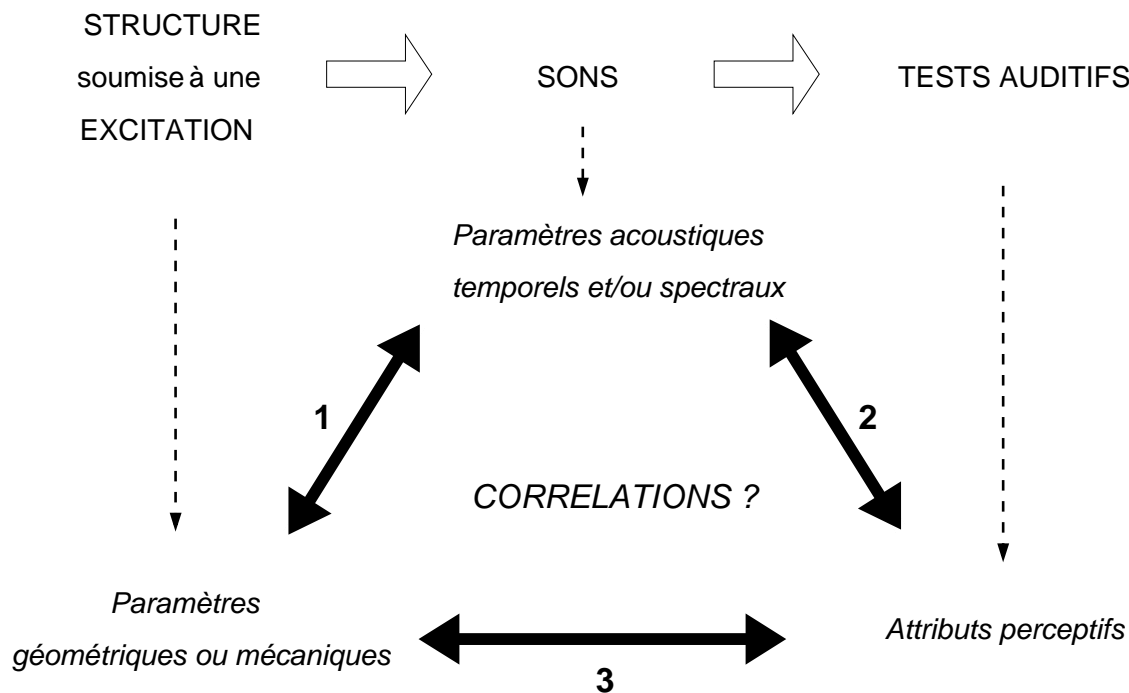


FIG. 1.1 – Schéma décrivant les principales étapes d'une étude psychomécanique

1.2 Indicateurs psychoacoustiques des sons transitoires

L'ensemble de nos études a la particularité de porter sur des sons transitoires. Les caractéristiques perceptives de ces sons sont encore mal connues surtout lorsqu'il s'agit de sons complexes inharmoniques. Dans cette partie nous décrivons les paramètres perceptifs qui apparaissent principalement dans nos études, à savoir : la sonie, la hauteur tonale, le timbre et les fluctuations de niveau des sons.

1.2.1 La sonie

La sonie est une grandeur sensorielle. Les premiers travaux sur la sonie ont été publiés au début du 20^{ième} siècle. C'est l'intensité perçue que l'on peut nommer "intensité subjective". Son unité est le sone ; un sone est la sonie d'un son pur de 1000 Hz à un niveau de pression de 40 dB. Cette grandeur dépend de l'intensité, de la fréquence et de la durée [25]. La sonie des sons impulsionnels n'est pas encore bien modélisée et a fait l'objet de nombreux travaux. Boulet [26] a notamment étudié l'influence de différents paramètres (fréquence, énergie, durée, décours temporel...) sur la sonie des sons impulsionnels dans le but de mettre au point un estimateur.

Les modèles de sonie sont bien connus pour des sons stationnaires. Nous pouvons citer les deux plus récents : celui de Zwicker [27] [28] [29] et celui de Moore et Glasberg [30].

Pour les sons non stationnaires, il existe le modèle de Glasberg et Moore [31] et celui de Zwicker et Fastl [32] [27].

Le modèle que nous avons choisi d'utiliser est celui de Zwicker et Fastl, qui tient

compte du masquage temporel. Les différentes étapes du modèle sont décrites en Annexe A. Chaque signal temporel est décomposé en plusieurs portions de 10 ms. Les diagrammes de sonie, calculés toutes les 10 ms, permettent ainsi d'obtenir ce que nous appellerons par la suite des "représentations temps-fréquence sensorielles". Cette représentation décrit la sonie évoluant en fonction du temps suivant l'échelle des Barks.

Le Bark est une unité définie par Zwicker (voir [33]) et fréquemment employée dans nos recherches, c'est pourquoi il est nécessaire d'en donner une définition. Les Barks sont des bandes de fréquences représentant les bandes critiques. Les bandes critiques mettent en évidence une propriété de l'oreille qui traite le signal par bandes de fréquences. La largeur des bandes critiques est constante (100 Hz) jusqu'à 500 Hz et augmente de 20% au-delà. Zwicker a approché les bandes de Barks en déterminant des bandes critiques approchées qui sont des bandes ou des groupes de bandes de tiers d'octave. Elles sont définies en Annexe B.

Les représentations temps-fréquence sensorielles permettent d'observer les effets de masquage qui dépendent du niveau et de la fréquence. Les effets de masquage sont observables sur les représentations temps-fréquence sensorielles car Zwicker et Fastl se servent des courbes d'effet de masque pour modéliser la sonie dans les différentes bandes de Bark.

1.2.2 La hauteur tonale

La hauteur tonale définie par l'AFNOR [34] est le "caractère de la sensation auditive liée à la fréquence d'un son périodique, qui fait dire que le son est aigu ou grave selon que cette fréquence est plus ou moins élevée". Seulement, cette définition se basant uniquement sur la fréquence ne prend pas en compte une autre dimension de la hauteur tonale : celle utilisée par les musiciens et selon laquelle un Do3 et un Do4 ont une hauteur plus proche qu'un Do3 et un La3 pourtant plus proches en fréquence. C'est pourquoi, pour nos études nous considérerons que la hauteur a deux dimensions, celles mises en évidence par Shepard [35] : la dimension "grave/aigue" (celle de la l'AFNOR) et une dimension "chroma" sur laquelle deux sons purs sont similaires si leurs fréquences sont en rapport 2 (formant ainsi un intervalle d'octave). Pour les sons complexes harmoniques, plusieurs hauteurs ont été mises en évidence dans la littérature [25] :

- la hauteur fondamentale, c'est la perception de la hauteur de la fréquence fondamentale ;
- la hauteur brute est relative à la richesse spectrale des sons. Deux sons complexes harmoniques de même fréquence fondamentale mais ayant des enveloppes spectrales différentes (concentrée dans les graves ou les aigus) auront une hauteur différente ;
- la hauteur spectrale est évoquée lorsque l'on perçoit la hauteur d'un son pur parmi toutes les autres composantes.

Nos travaux ont la particularité de porter sur des sons complexes inharmoniques. Peu de références sont recensées sur ce sujet. Nous pouvons citer celle de Grandori [36] qui réalisa une expérience d'appariement de hauteur tonale d'un son complexe inharmonique par un son pur. Il a traité le cas de quatre sons complexes dont les composantes étaient le rapport d'une composante f_0 (égale à 1000 Hz) par n variant de 1 à k ($k=$

7, 6, 5 et 4 pour chaque son). Les sujets basaient leurs jugements sur une composante qui était une harmonique d'une autre composante. La hauteur des fréquences présentant une relation harmonique était prépondérante sur celle des autres composantes.

Des algorithmes d'extraction de la hauteur tonale de sons complexes ont été réalisés par Terhardt et Coll. [37] [38]. De Cheveigné et Kawahara ont, quant à eux, mis au point un estimateur de fréquence fondamentale [39].

1.2.3 Le timbre

La définition du timbre donnée par l'ANSI [40] est la suivante : "timbre is that attribute of auditory sensation in terms of which a listener can judge that two sounds similarly presented and having the same loudness and pitch are dissimilar". Marozeau [41] commente cette définition en ajoutant qu'elle "ne dit pas ce qu'est le timbre mais ce qu'il n'est pas".

Nous allons présenter quels sont les attributs du timbre à travers deux études qui montrent sa multidimensionalité. Grey [42] a étudié les caractéristiques du timbre de sons d'instruments de musiques resynthétisés de façon à ce que tous les sons aient la même fréquence fondamentale, la même durée et la même intensité. Une analyse multidimensionnelle des sons a mis en évidence trois dimensions du timbre. La première était liée à la distribution spectrale de l'énergie qui correspond à la brillance des sons. La seconde correspond à une synchronisation ou non de l'évolution temporelle des différentes harmoniques. La dernière dimension correspond à l'attaque des sons selon si elle est "explosive" ou pas.

Plus récemment, Krimphof et Coll. [43] ont réalisé la même expérience de dissemblance mais portant sur des sons de synthèse d'instruments de musique dont les enveloppes temporelles et spectrales avaient été modifiées. Trois dimensions perceptives ont été identifiées. La première était comme dans l'expérience de Grey, liée à la brillance des sons. Pour caractériser les différences selon cette dimension, les auteurs ont calculé le centre de gravité des sons en utilisant la formule suivante :

$$CGS = \frac{\sum_{k=1}^N k A_k}{\sum_{k=1}^N A_k} \quad (1.2)$$

N est le nombre de composantes du spectre, k est le numéro de la composante et A est l'amplitude d'une composante.

La seconde dimension était liée à l'attaque des sons et était corrélée au logarithme du temps de montée des signaux. La dimension 3 était liée aux irrégularités du spectre. Pour traduire ces irrégularités, ils ont défini un paramètre qui calcule l'écart entre la structure fine du spectre et son enveloppe spectrale.

Ces études ont montré les dimensions temporelles (attaque), spectrales (brillance) et spectro-temporelles (synchronisation de l'évolution temporelle des harmoniques) du timbre. De plus, Krimphof et Coll. ont associé à chaque dimension un paramètre acoustique des sons, notamment le centre de gravité spectral que nous utiliserons lors de nos études. Ces résultats ont été confirmés par Caclin et Coll. [44].

Les dimensions du timbre ont également été mises en évidence avec les études psychomécaniques notamment lorsque les études portaient sur l'effet de la variation de l'amortissement [7].

La brillance d'un son est un terme que nous n'avons pas défini jusqu'ici. C'est une dimension (spectrale) du timbre. On nomme un son brillant, un signal dont les composantes de plus fort niveau sont concentrées vers les hautes fréquences. En revanche, on appelle un son mât un signal dont les composantes de plus fort niveau sont concentrées vers les basses fréquences. Krimphof et Coll. [43] ont trouvé que plus le CGS d'un son était élevé, plus le son était brillant ; inversement plus le CGS d'un son était faible plus le son est mât.

1.2.4 L'acuité

La notion d'acuité d'un son est très liée à celle de brillance. L'acuité d'un son se calcule en Acum ; un Acum représente l'acuité d'un bruit centré sur 1 kHz, de largeur 160 Hz à un niveau de pression acoustique de 60 dB. Dans les études menées, l'acuité a été calculée selon le modèle de Zwicker et Fastl [27] basé sur le calcul du barycentre du diagramme de densité de sonie. L'acuité d'un son est élevée si l'énergie du signal est concentrée dans les bandes de Bark supérieures. Inversement, l'acuité d'un son est faible si l'énergie du signal est concentrée dans les premières bandes de Bark.

1.2.5 Les fluctuations de niveau

Des variations temporelles de sons modulés en amplitude mènent à deux attributs perceptifs différents : à des fluctuations de niveau (appelée aussi force de fluctuation ou fluctuation de sonie) si la fréquence de modulation est basse et à de la rugosité si la fréquence est plus élevée. Le passage d'une sensation à l'autre se fait environ pour une fréquence de modulation de 20 Hz. Fastl [45] indique que les fluctuations de niveau dépendent :

- de la fréquence de modulation : la perception de fluctuations de niveau est maximale pour une fréquence de modulation située entre 2 et 6 Hz ;
- de la profondeur de modulation : en dessous de 3 dB, les fluctuations ne sont pas perceptibles, au-dessus la sensation croît quasi-linéairement avec la profondeur ;
- du niveau : pour une augmentation du niveau de 40 dB, la sensation est multipliée par un facteur 3.

Fastl décrit un modèle de calcul de force de fluctuation de niveau en prenant en compte ces trois paramètres.

Dans notre cas, pour les sons de plaques, la présence de fluctuations de niveau est essentiellement due à la proximité de deux composantes spectrales de forte amplitude (qui sont les fréquences de résonance de la plaque). Les fréquences de modulation sont identifiables à partir des écarts entre les paires de composantes spectrales responsables de la sensation de fluctuation de niveau. Dans la suite, nous prendrons essentiellement en compte les fréquences de modulation des signaux pour décrire les différences de fluctuation de niveau entre les sons de plaque.

1.3 Présentation des travaux

Dans les travaux présentés dans la suite du manuscrit, nous menons des études psychomécaniques des sons transitoires rayonnés par des plaques. Deux approches sont utilisées en psychomécanique : une approche plutôt "acoustique" (sur l'effet de la variation des paramètres) et une approche plus "écologique" (sur la reconnaissance de sources).

Dans le cadre d'une approche plutôt acoustique, nous nous sommes intéressés au cas particulier du rayonnement d'une plaque en acier encastrée soumise à une impulsion de durée finie. Trois sujets ont été abordés. Le premier consiste à comprendre l'effet perceptif de la variation des paramètres mécaniques de la structure ou de l'excitation en terme de similarité et d'agrément. Le second pose le problème de la simplification d'un modèle de plaque d'épaisseur variable par celui d'une plaque d'épaisseur constante équivalente dont le son rayonné serait similaire, d'un point de vue perceptif, à celui du son de plaque d'épaisseur variable. Le dernier sujet concerne la comparaison de sons enregistrés et de sons synthétisés. Le principal objectif est de déterminer le meilleur recalage des paramètres du modèle afin que le son synthétisé soit le plus semblable au son enregistré.

Pour l'ensemble des études menées, nous avons choisi de faire varier des paramètres mécaniques (amortissement) ou géométriques (longueur, largeur, épaisseur) de la plaque et des paramètres de l'excitation (durée, lieu d'impact). Des sons ont été synthétisés puis soumis à des tests d'agrément et de similarité. Des tests d'appariement de hauteur tonale sur les sons de plaque ont également été menés. Pour chaque étude, nous avons tenté d'identifier les attributs perceptifs utilisés par les auditeurs et les paramètres acoustiques/physiques associés aux sons. Puis, nous avons essayé d'établir des liens de type 1 et/ou 2 et/ou 3 (définis à la figure 1.1) lorsque nous les avons identifiés.

Chapitre 2

Synthèse des signaux de plaques encastrées

Les études présentées dans le document concernent la psychomécanique des sons transitoires rayonnés par des plaques minces élastiques. Le point de départ de la psychomécanique concerne l'émission des sons rayonnés par des structures vibrantes. Nous traitons le cas particulier d'une plaque rectangulaire excitée par une force mécanique de durée finie. Pour mieux comprendre l'effet de la variation de paramètres du système étudié (plaque excitée par une impulsion) sur la perception des sons rayonnés par celui-ci, nous avons choisi de travailler avec des sons de synthèse. Cela présente l'avantage de faire varier les paramètres indépendamment les uns des autres. Il existe différents modèles pour calculer, dans le domaine temporel, la pression rayonnée par une plaque soumise à une excitation de durée finie. Pour leur modèle, Chaigne et Lambourg [46] calculent la pression rayonnée en utilisant une méthode basée sur des calculs de différences finies [47]. Le modèle théorique que nous avons utilisé pour calculer le champ de pression rayonné par la plaque, modèle basé sur un développement en fonction des modes de résonance, est présenté dans la première partie de ce chapitre.

Notre première étude présentée au chapitre 3 concerne l'effet sur la perception de la variation de l'amortissement du matériau, de la modification du lieu et de la durée d'impact. Dans le chapitre suivant, le problème de la simplification de la modélisation d'une plaque d'épaisseur complexe par une plaque d'épaisseur constante est posé. Enfin, dans le dernier chapitre certains paramètres de la plaque (longueur, largeur, épaisseur et amortissement) sont légèrement modifiés pour la synthèse de façon à ce que ce son de synthèse soit le plus semblable possible d'un son enregistré rayonné par une plaque dont les caractéristiques mécaniques correspondent à celles utilisées dans la synthèse. Dans l'ensemble des travaux présentés, l'effet perceptif de la modification des paramètres mécaniques ou géométriques est traité. Par conséquent, la seconde partie de ce présent chapitre présente les effets uniquement physiques de la variation de l'ensemble des paramètres traités sur le signal acoustique rayonné. Cette description correspond à la connexion de type 1 du schéma 1.1 du chapitre 1.

2.1 Modèle théorique : Pression rayonnée par la plaque

Ce paragraphe présente les principales étapes de la méthode utilisée pour calculer le champ de pression rayonné par la plaque. Les détails théoriques de cette méthode basée sur un développement en fonction des modes de résonance sont présentés par Habault et Filippi [48] et [49]. Cette méthode présente l'avantage de prendre en compte l'excitation dans le domaine temporel puis de synthétiser le signal sonore dans le domaine temporel également.

La structure étudiée est une plaque mince et rectangulaire. Elle occupe le domaine (Σ) du plan $z = 0$ (figure 2.1). Dans ce plan, la plaque est encastrée sur tout son contour $\partial\Sigma$ et prolongée par une surface parfaitement rigide (Σ') . Le matériau de la plaque est isotrope, homogène et élastique ; il est caractérisé par un module d'Young E , un coefficient de Poisson ν et une masse volumique ρ_p . La plaque, d'épaisseur h , est immergée dans un fluide considéré comme parfait, de masse volumique ρ_f et de célérité c_f . Les deux demi-espaces Ω^+ ($z > 0$) et Ω^- ($z < 0$) contiennent ce fluide au repos. Le schéma du système est présenté à la figure 2.1.

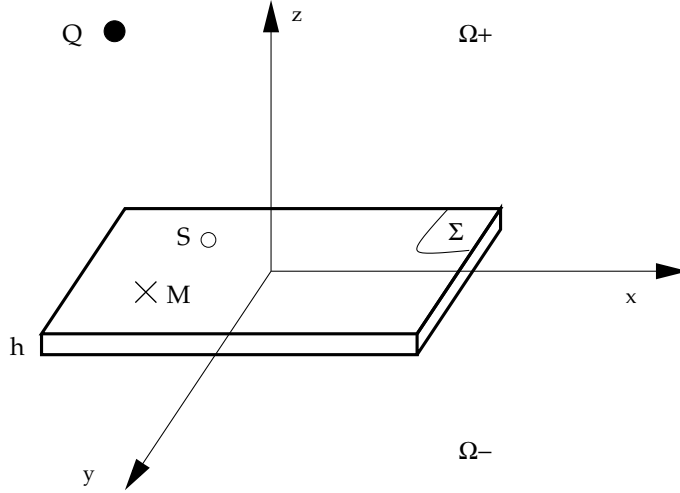


FIG. 2.1 – Schéma du système étudié

La plaque est excitée par une force mécanique de durée finie $\tilde{F}(M, t) = \tilde{\Psi}(t)f(M)$ en un point S de la plaque.

Le système d'équations du problème en régime temporel est défini par :

- l'équation de d'Alembert :

$$\Delta \tilde{p}^\pm(Q, t) - \frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 \tilde{p}^\pm}{\partial t^2}(Q, t) = 0 \quad \text{dans } \Omega^{+/-} \quad (2.1)$$

- l'équation des plaques :

$$(D\Delta^2 + \rho_p h \frac{\partial^2}{\partial t^2}) \tilde{W}(M, t) = \tilde{F}(M, t) - (\tilde{p}^+(M, t) - \tilde{p}^-(M, t)) \quad \text{sur } \Sigma, \quad (2.2)$$

- la continuité de l'accélération normale du fluide et de l'accélération de la plaque :

$$-\frac{\partial \tilde{p}}{\partial z}(M, t) = \rho_f \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial t^2}(M, t) \quad \text{sur } \Sigma, \quad (2.3)$$

- les conditions aux limites d'encastrement (déplacement et vitesse normale nuls le long des bords) :

$$\begin{cases} \tilde{W}(M, t) = 0 \\ \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \vec{n}} = 0 \end{cases} \quad \text{sur } \Sigma, \quad (2.4)$$

- la condition à l'infini pour la pression.

\tilde{W} représente le déplacement, \tilde{p}^+ et \tilde{p}^- sont respectivement les champs de pression (dans le domaine temporel) dans Ω^+ et Ω^- et $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ est la rigidité à la flexion de la plaque.

Le but est de calculer le champ de pression en un point Q de l'espace Ω^+ . Les différentes étapes du calcul sont présentées sur le schéma 2.2.

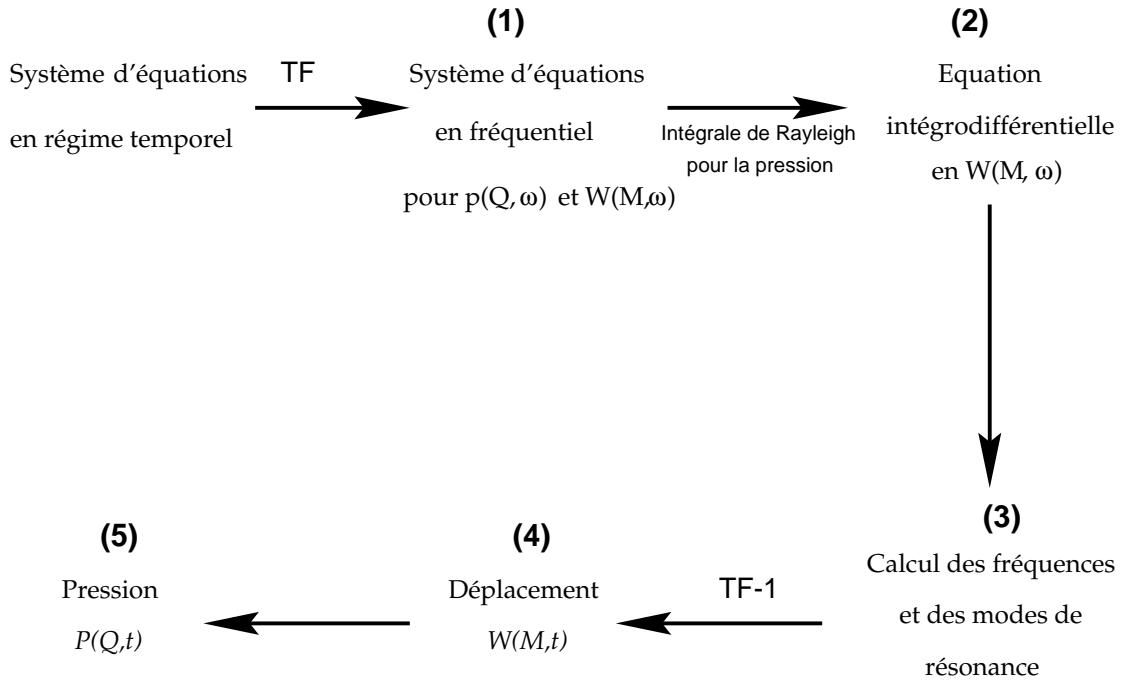


FIG. 2.2 – Différentes étapes pour le calcul du champ de pression rayonné par la plaque

Nous avons un système d'équations en régime temporel où le déplacement $\tilde{W}(M, t)$ et la pression $\tilde{p}(Q, t)$ sont les deux inconnues du problème. Pour éliminer une inconnue, nous allons tout d'abord traiter le problème en régime fréquentiel (1) et ensuite exprimer la pression en fonction du déplacement en introduisant la représentation de Green de la pression. Ainsi, nous obtenons une équation intégrodifférentielle dont la seule inconnue est le déplacement (2). Ensuite, nous allons décrire le déplacement

$\tilde{W}(M, t)$ comme une somme des modes de résonance du système couplé plaque/fluide puis les calculer (3). Nous pourrions ensuite déduire le déplacement $\tilde{W}(M, t)$ (4) et enfin la pression rayonnée $\tilde{p}(Q, t)$ (5).

La première étape consiste donc à poser le problème dans le domaine fréquentiel à l'aide d'une transformée de Fourier. La transformée de Fourier $\phi(M, \omega)$ d'une fonction $\tilde{\phi}(M, t)$ est classiquement définie par :

$$\phi(M, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\phi}(M, t) e^{i\omega t} dt$$

La nouvelle formulation en régime fréquentiel est donc présentée par l'ensemble d'équations 2.5.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p^\pm(Q, \omega) + k_f^2 p^\pm(Q, \omega) = 0 \\ (D\Delta^2 - \rho_p h \omega^2) W(M, \omega) = F(M, \omega) - (p^+(M, \omega) - p^-(M, \omega)) \\ \frac{\partial p}{\partial z}(M, \omega) = \omega^2 \rho_f W(M, \omega) \\ W(M, \omega) = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial \vec{n}}(M, \omega) = 0 \\ \text{Condition de Sommerfeld} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

k_f est le nombre d'onde dans le fluide.

La seconde étape consiste à formuler la pression $p^{+/-}(M, \omega)$ en fonction du déplacement $W(M, \omega)$ grâce à la représentation de Green de la pression pour le problème de Neuman homogène. Cette relation est donnée par l'expression suivante :

$$P^{+/-}(M, \omega) = \text{sgn}(z) \omega^2 \rho_f \int_{\Sigma} W(M', \omega) \mathcal{G}^\omega(M, M') d\sigma(M') \quad \text{où } M' \in \Sigma \quad (2.6)$$

\mathcal{G}^ω est la fonction de Green en espace semi-infini pour le problème de Neuman. \mathcal{G}^ω est la solution de l'équation de Helmholtz, satisfait les conditions de Sommerfeld à l'infini et la condition de Neuman homogène sur le plan $z = 0$.

$$\mathcal{G}^\omega(Q, Q') = -\frac{e^{\frac{-i\omega r(Q, Q')}{c_f}}}{4\pi r(Q, Q')} - \frac{e^{\frac{-i\omega r(Q, Q'')}{c_f}}}{4\pi r(Q, Q'')}, \quad (2.7)$$

$r(Q, Q')$ est la distance entre deux points Q et Q' ; Q' et Q'' sont deux points symétriques par rapport au plan $z = 0$.

Si M et M' sont deux points de Σ , alors M' et M'' sont confondus et on obtient l'expression suivante :

$$\mathcal{G}^\omega(M, M') = -\frac{e^{\frac{-i\omega r(M, M')}{c_f}}}{2\pi r(M, M')}, \quad (2.8)$$

où $r(M, M') = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$.

En introduisant la forme bilinéaire $\langle W, U \rangle = \int_{\Sigma} W(M) U^*(M) d\sigma(M)$, où U^* est le complexe conjugué de U , on peut ramener le système différentiel 2.5 à l'équation intégrodifférentielle 2.9 écrite sous la forme variationnelle suivante où la seule inconnue est le déplacement $W(M, \omega)$. Les détails de calculs sont présentés par Habault et Filippi dans les références [50], [51], [48] et [49].

$$a(W, U) - \rho_p h \omega^2 \left\{ \langle W, U \rangle - \underbrace{\frac{\rho_f}{\rho_p h} \beta^\omega(W, U)}_C \right\} = \Psi(\omega) \langle f, U \rangle \quad (2.9)$$

Si $W = U$ alors :

- $a(W, W)$ représente l'énergie potentielle de la plaque, son expression est donnée dans [49],
- $\rho_p h \omega^2 \langle W, W \rangle$ représente l'énergie cinétique,
- $\beta^\omega(W, W)$ est proportionnel à l'énergie que perd la plaque par rayonnement acoustique, son expression est donnée dans [49]. Il caractérise alors le couplage entre la plaque et le fluide.

Son expression dépend de ω à travers la fonction de Green. Nous remarquerons également qu'en introduisant $\beta^\omega = 0$ (c'est-à-dire pour une plaque dans le vide) l'équation 2.9 devient la forme variationnelle classique de l'équation des plaques.

D'autre part, ce terme est fortement pondéré par le rapport de la densité volumique du fluide par celui de la plaque (paramètre de couplage $\frac{\rho_f}{\rho_p h}$). Par exemple, dans le cas d'un fluide léger tel que l'air, le terme C est petit. En revanche, dans le cas d'un fluide lourd tel que l'eau, le terme C devient grand.

La troisième étape consiste à définir les fréquences (ω_n) et modes de résonance (W_n) du système couplé. Ce sont les solutions (ω_n, W_n) du système homogène 2.10.

La troncature modale dépend du problème étudié. Pour chaque étude, nous avons choisi un nombre de mode suffisant pour décrire le domaine fréquentiel étudié. Ce dernier dépend de la fonction d'excitation. Par conséquent, lorsque la durée d'impact est importante, un petit nombre de modes est pris en compte. Inversement, pour une durée d'impact faible le nombre de modes pris en compte est élevé.

$$a(W_n, U) - \Lambda_n \left\{ \langle W_n, U \rangle - \frac{\rho_f}{\rho_p h} \beta^{\omega_n}(W_n, U) \right\} = 0 \quad (2.10)$$

Λ_n sont les valeurs de resonance.

L'avant-dernière étape consiste à montrer que le déplacement peut s'écrire comme une série de ces modes de résonance et permet d'obtenir l'expression suivante 2.11 du déplacement $\widetilde{W}(M, t)$.

$$\begin{aligned} \widetilde{W}(M, t) = -i \widetilde{\psi}(t) *_{\mathbf{t}} Y(t) \sum_{n=1}^{\infty} & \left[\frac{W_n^*(S)}{\Lambda_n'(\omega_n) - 2\rho_p h \omega_n} W_n(M) e^{-i\omega_n t} \right. \\ & \left. - \frac{W_n(S)}{\Lambda_n'^*(\omega_n) - 2\rho_p h \omega_n^*} W_n^*(M) e^{+i\omega_n^* t} \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

où W_n^* est le complexe conjugué de W_n et Λ_n' est la dérivée de Λ_n par rapport à ω . Enfin, nous obtenons l'expression 2.12 de la pression $\widetilde{P}(Q, t)$.

$$\begin{aligned} \tilde{P}(Q, t) = \text{sgn}(z) \rho_f \tilde{\mathcal{G}}(M, t) \underset{(M,t)}{*} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left\{ -i \underset{t}{\tilde{\psi}}(t) * Y(t) \right. \\ \left. \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{W_n^*(S)}{\Lambda_n'(\omega_n) - 2\rho_p h \omega_n} W_n(M) e^{-i\omega_n t} - \frac{W_n(S)}{\Lambda_n^*(\omega_n) - 2\rho_p h \omega_n^*} W_n^*(M) e^{+i\omega_n^* t} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.12)$$

où $\Lambda_n(\omega_n) = \rho_p h \omega_n^2$,

$Y(t)$ est la fonction de Heavyside,

$*$ est le produit de convolution en temps,

$\underset{(M,t)}{*}$ est le produit de convolution en temps et en espace.

Pour le calcul du champ de pression, l'expression analytique de l'excitation en fonction du temps est décrite par l'expression 2.13 :

$$\tilde{\psi}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0, \\ 1 - \cos(2\pi \frac{t}{T_1}) & \text{si } 0 < t < \frac{T_1}{2}, \\ 1 + \cos(2\pi \frac{t - \frac{T_1}{2}}{T_2}) & \text{si } \frac{T_1}{2} < t < \frac{T_1 + T_2}{2}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Où T_1 et T_2 sont respectivement les temps de montée et de descente de l'excitation si bien que la somme $T_1 + T_2$ constitue la durée d'impact totale. Dans les chapitres 3 et 4, T_1 est égal à T_2 alors que dans le chapitre 5 ces deux valeurs sont distinctes afin de mieux approximer la fonction d'excitation mesurée.

Pour la synthèse des signaux nous ferons les approximations suivantes :

- les modes de résonances sont les modes propres de la plaque,
- les fréquences de résonances sont les fréquences propres de la plaque auxquelles on ajoute une petite perturbation.

La synthèse de ces signaux présentent des difficultés numériques qui nécessitent de nombreuses autres approximations qui sont détaillées par Habault et Filippi [51]

2.2 Effet de la variation de paramètres du système sur le champ de pression rayonné

Dans ce qui va suivre, nous rappelons l'effet de la variation de quelques paramètres mécaniques et géométriques du système sur la pression rayonnée par la plaque tant d'un point de vue temporel que fréquentiel. Cinq paramètres particuliers ont été étudiés. Les deux premiers concernent la géométrie de la plaque : il s'agit de l'épaisseur h et des dimensions (longueur L_y et largeur L_x). Le troisième paramètre concerne les propriétés du matériau : c'est l'amortissement structural. Enfin, les deux derniers paramètres sont liés à l'excitation puisqu'il s'agit de la durée et du lieu d'impact.

2.2.1 Epaisseur de la plaque

L'effet de la variation d'épaisseur dans le cadre de la psychomécanique a été étudié par Faure [11] dans le cas de sons transmis à travers une plaque. Dans ses travaux, l'épaisseur était constante sur toute la surface de la plaque.

Dans ce paragraphe, pour mettre en évidence l'influence de l'épaisseur de la plaque, nous considérons deux cas. Tout d'abord, nous allons comparer les caractéristiques de deux sons rayonnés par des plaques d'épaisseurs différentes et constantes sur toute leur surface. Dans le second cas, nous allons comparer les caractéristiques d'un son rayonné par une plaque d'épaisseur constante et d'un autre rayonné par une plaque d'épaisseur variable.

L'épaisseur influence directement les fréquences propres de la plaque [52] ; une augmentation de 20% de l'épaisseur engendre une augmentation de 20% de chaque fréquence propre. Les fréquences propres étant les composantes spectrales du son rayonné, cette augmentation se traduit par un décalage de 20% de chaque composante spectrale. Le graphique de gauche de la figure 2.3 illustre cette constatation ; il présente le spectre d'un son de plaque de 5 mm d'épaisseur et celui d'un son de plaque d'épaisseur 6 mm.

Le graphique de droite de la figure 2.3 présente les spectres d'un son de plaque d'épaisseur variable (bosselée) et d'un son de plaque d'épaisseur constante. L'épaisseur de la plaque bosselée a été définie à partir d'une épaisseur minimum h_0 à laquelle on a ajouté des bosses d'amplitude $h(x, y)$. L'expression de l'épaisseur résultante est : $EP(x, y) = h_0 + h(x, y)$. Pour le cas traité ici, $h_0 = 5\text{mm}$ et $h(x, y) \leq 1\text{mm}$. Les composantes spectrales sont décalées de façon non uniforme. Le décalage maximum est de 20% puisque l'épaisseur maximale est de 6 mm.

L'effet de la variation d'épaisseur sur le niveau des composantes est très faible. Pour une variation de l'ordre de 20 %, les différences de niveau dues à la variation d'épaisseur sont de l'ordre de 2 ou 3 dB.

2.2.2 Longueur et largeur de la plaque

La modification de la longueur et/ou de la largeur a un effet sur les fréquences propres de la plaque. La figure 2.4 présente le décalage du spectre d'un son de plaque de géométrie $L_{x1}L_{y0}$ par rapport au spectre d'un autre son de plaque de géométrie

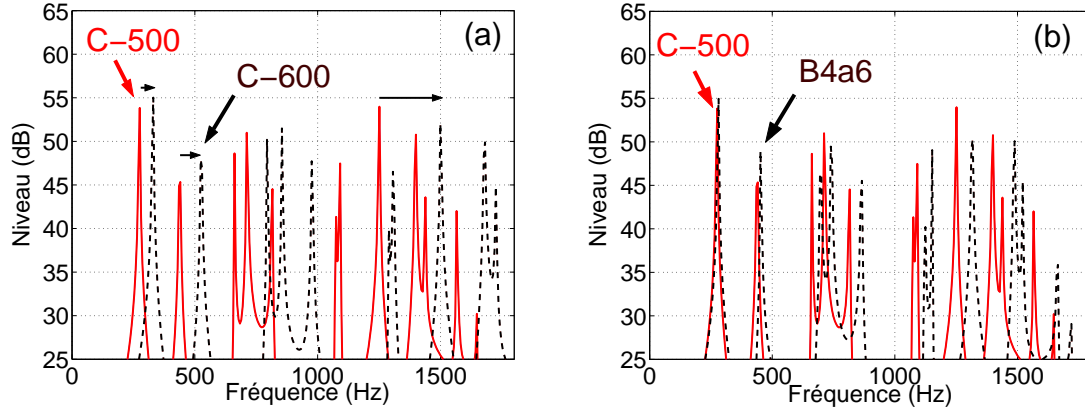


FIG. 2.3 – Spectres de sons rayonnés. (a) Sons de plaques d'épaisseurs constantes 5 mm (C-500) et 6 mm (C-600); (b) Sons de plaques d'épaisseur constante 5 mm (C-500) et d'épaisseur variable (B4a6)

$L_{x0}L_{y0}$. La largeur de la première plaque est 0,3 % plus importante que celle de la seconde. Cet exemple a été choisi car il correspond à deux sons étudiés dans le chapitre 5. Nous observons sur le graphique que certains partiels sont décalés en fréquence (cas 1 sur la figure) alors que d'autres restent à la même fréquence (cas 2 sur la figure). En fait, les fréquences propres sont modifiées d'un pourcentage différent suivant les fréquences. C'est pourquoi les composantes spectrales associées sont plus ou moins modifiées.

Les différences de niveau sont également très faibles comme dans le cas de la variation d'épaisseur.

2.2.3 Amortissement de la structure

L'effet de la variation de l'amortissement structurel a été abordé par Faure [11] et l'effet de l'amortissement viscoélastique a été traité par Roussarie [8] et McAdams [7]. Il existe différents modèles d'amortissement qui dépendent de la fréquence. Dans toutes les études présentées ici, on se contente d'introduire l'amortissement dans le système d'équations 2.5 du problème fréquentiel. L'amortissement η est pris en compte dans la petite partie imaginaire du module d'Young E :

$$E = E_0(1 - i\eta)$$

La pression peut alors être approchée par une expression de la forme :

$$P(M, t) = \sum_n C_n(S, M) e^{-i\omega_n t} e^{-\omega_n \frac{\eta t}{2}}$$

où les coefficients C_n sont indépendants du temps ; la somme est effective sur tous les modes. L'effet de la variation de l'amortissement de la structure est donc essentiellement temporel. Une variation de ce paramètre influence le temps de décroissance du signal c'est-à-dire la durée des signaux. Plus le matériau est amorti, plus les pentes

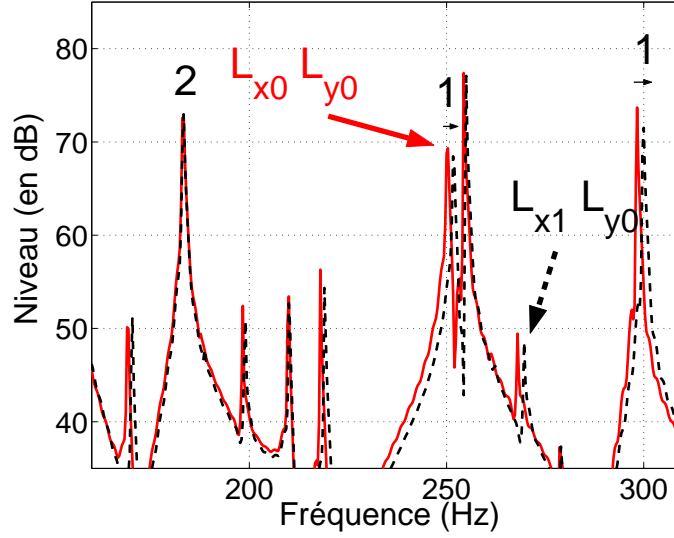


FIG. 2.4 – Effet de la variation de la dimension d'une plaque. Spectre d'un son de plaque de géométrie $L_{x0}L_{y0}$ et d'un son de plaque de géométrie $L_{x1}L_{y0}$ dont la largeur a été augmentée de 0,3 %

des courbes décrivant la décroissance sont importantes, plus le son rayonné est atténué rapidement.

L'expression du niveau de pression $N(t)$ en dB en fonction du temps devient alors :

$$N(t) = 20 \log \frac{P(M, t)}{P_0} \quad (2.14)$$

$$N(t) = \left(\frac{20 \pi}{\ln(10)} \eta f \right) t + D(S, M) \quad (2.15)$$

Cette formule est valable pour un mode propre c'est-à-dire pour une fréquence propre. Le coefficient $D(S, M)$ est indépendant du temps. Par conséquent, la décroissance du niveau en décibels se comporte comme une fonction linéaire $N(t) = at + b$ où le coefficient directeur $a = \frac{20 \pi}{\ln(10)} \eta f$ est proportionnel à l'amortissement et à la fréquence. Cette expression montre qu'à η constant, les composantes hautes fréquences sont amorties plus rapidement que les composantes basses fréquences.

Ces remarques peuvent être illustrées par les représentations temps-fréquence (ondelettes de Ausher) à la figure 2.5 des sons 1 et 9 de l'étude du chapitre 3. Ces tracés correspondent aux 500 premières millisecondes des signaux sur les bandes de tiers d'octave allant de 272 à 9630 Hz.

Les composantes spectrales du son 1 dont l'amortissement est de 10^{-4} sont très faiblement amorties au bout de 500 ms. En revanche, le son 9 pour lequel l'amortissement est de 10^{-2} a toutes ses composantes atténuées au bout de 500 ms. Les composantes hautes fréquences du son 9 sont plus rapidement amorties que les basses fréquences.

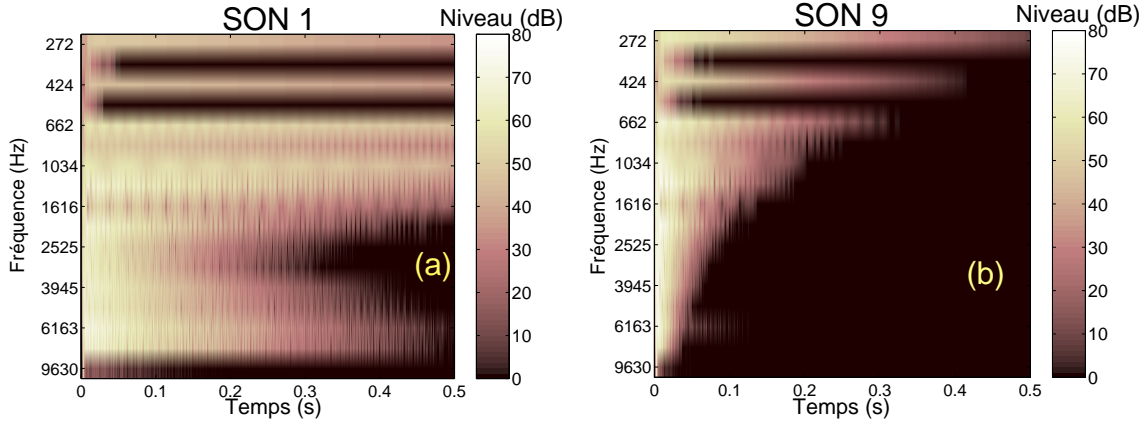


FIG. 2.5 – Représentations temps fréquence par bandes de tiers d’octave sur 500 ms de signal. (a) Son 1 ($\eta = 10^{-4}$) ; (b) Son 9 ($\eta = 10^{-2}$)

2.2.4 Durée d’impact

Toutes les études développées dans le document traitent le cas d’une plaque excitée par une force mécanique de durée finie. La durée de l’impact est l’une des variables dont nous avons observé les effets. L’expression du champ de pression dans le domaine fréquentiel est donné par l’expression suivante [49] :

$$\begin{aligned}
 P(Q, \omega) = \text{sgn}(z)\omega^2\rho_f\psi(\omega) & \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{W_n^*(S)}{\Lambda_n'(\omega_n) - 2\rho_ph\omega_n} \int_{\Sigma} \frac{W_n(M')}{\omega - \omega_n} \mathcal{G}^{\omega}(M, M') d\sigma(M') \right. \\
 & \left. - \frac{W_n(S)}{\Lambda_n'^*(\omega_n) - 2\rho_ph\omega_n^*} \int_{\Sigma} \frac{W_n^*(M')}{\omega + \omega_n^*} \mathcal{G}^{\omega}(M, M') d\sigma(M') \right)
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Le comportement temporel de la fonction d’excitation intervient uniquement en facteur au travers de sa transformée de Fourier. Le facteur $\omega^2\psi(\omega)$ agit comme un filtre sur le spectre du champ de pression.

Pour comprendre l’effet de la durée d’impact, le cas où le temps de montée (T_1) et le temps de descente (T_2) de la formule 2.13 sont identiques est développé. La modification de la durée d’impact a un effet sur cette distribution spectrale. Pour évaluer son influence sur la pression existant dans le fluide, sur la figure 2.6, nous présentons trois courbes qui représentent le spectre de l’excitation multiplié par ω^2 , pour trois valeurs de la durée d’impact : 0, 1, 0, 5 et 2 ms. Pour faciliter la comparaison, les maxima absolus des 3 courbes ont été ramenés à la même valeur. Une durée d’impact importante correspond plutôt à un filtrage "passe-bas" des composantes basses fréquences du signal de pression. Inversement, à une durée d’impact faible correspond un filtrage "passe-haut". Aux très basses fréquences (correspondant aux premières résonances de la plaque), les plus hauts niveaux sont obtenus pour une durée d’impact maximale. C’est pourquoi sur les représentations temps-fréquence de la figure 2.7 le son 1 dont

la durée d'impact est de 0,1 ms a moins d'énergie en dessous de 500 Hz que le son 12 dont la durée d'impact est de 2 ms.

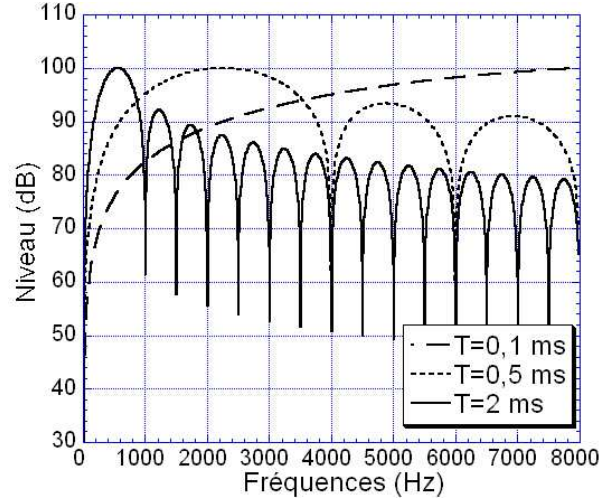


FIG. 2.6 – Spectres d'excitation multipliés par le facteur ω^2 pour 3 durées d'impact : 0,1 ms (en tirets), 0,5 ms (en pointillés) et 2 ms (en trait plein)

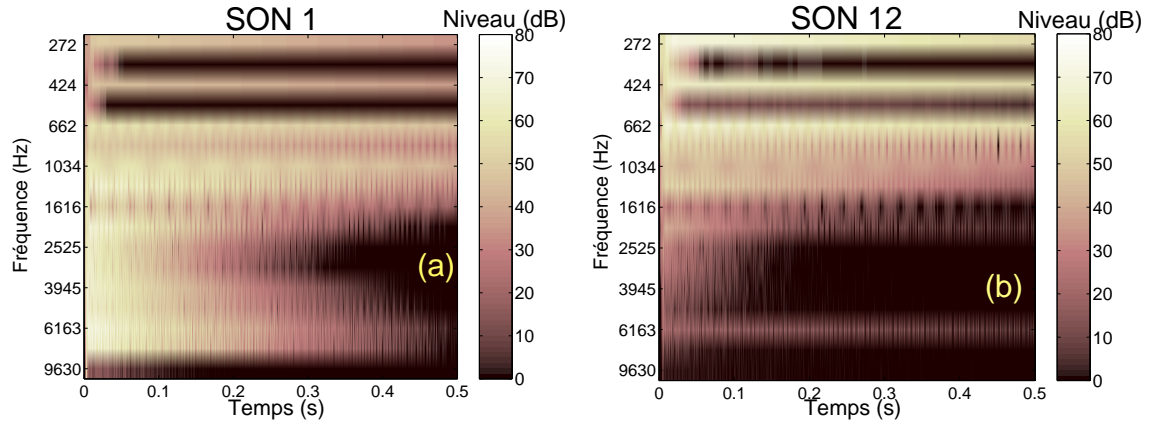


FIG. 2.7 – Représentations temps fréquence par bandes de tiers d'octave sur 500 ms de signal. (a) Son 1 (T=0,1 ms) ; (b) Son 12 (T=2ms)

2.2.5 Lieu d'impact

L'effet du lieu d'impact a été étudié par Houix [18] dans le cas des barres. La modification de ce paramètre entraîne une modification du nombre de composantes spectrales excitées. Notamment, une excitation au centre de la plaque engendre un nombre de composantes excitées faible. Inversement, si l'impact se situe à un coin de la plaque alors le nombre de modes excités est important. Les niveaux de certains partiels peuvent donc être nuls suivant le lieu d'excitation de la plaque. Considérons, par

exemple un son pour lequel l'excitation se situe dans un coin de la plaque (son 1) et un autre son dont l'excitation est au centre de la plaque (son 13). La figure 2.8 présente les représentations temps-fréquence de ces deux sons. Pour le son 1 des fréquences sont excitées dans les bandes centrées sur 424 et 1034 Hz alors qu'elles ne le sont pas dans le cas du son 13.

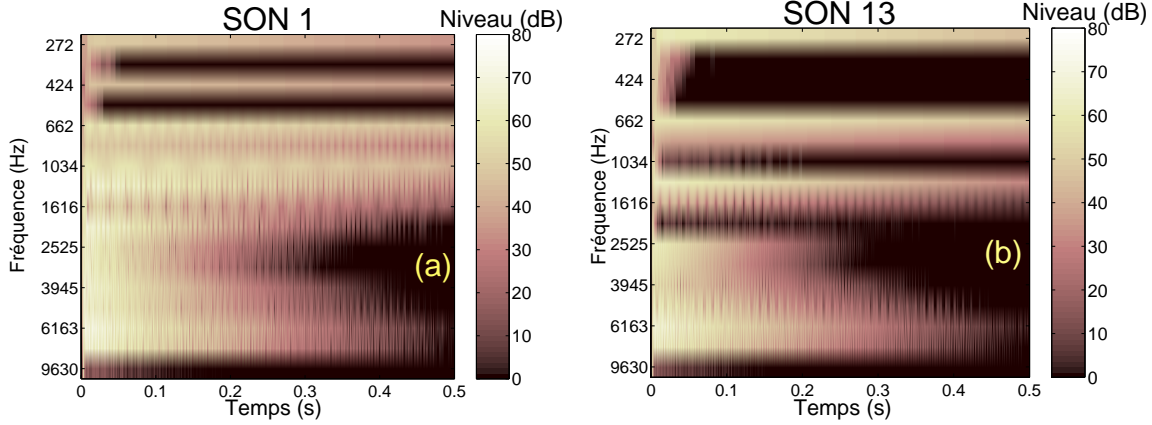


FIG. 2.8 – Représentations temps fréquence par bandes de tiers d'octave sur 500 ms de signal. (a) Son 1 (excitation dans un coin de la plaque) ; (b) Son 13 (excitation au centre de la plaque)

2.3 Conclusions

La méthode que nous avons utilisée afin de synthétiser le champ de pression rayonné par la plaque a été présentée dans la première partie de ce chapitre. Dans la seconde, nous avons montré l'effet de la variation de paramètres du système sur le signal de pression. Une augmentation d'épaisseur entraîne une augmentation des fréquences de résonance de la plaque et par conséquent un décalage des composantes spectrales vers les hautes fréquences. Une modification des dimensions de la plaque modifie également la valeur des composantes spectrales. En ce qui concerne l'amortissement, l'effet est essentiellement temporel puisqu'il influence fortement la décroissance temporelle des signaux et affecte principalement les composantes hautes fréquences qui sont plus rapidement amorties. Modifier la durée d'impact revient à modifier le type de "filtrage" du signal de pression. Quant à l'effet du lieu d'impact, il n'agit que sur le spectre. En effet, le spectre aura plus ou moins de composantes suivant la position de l'excitation.

Dans ce chapitre nous avons abordé les effets de la variation de paramètres mécaniques et géométriques sur les signaux de pression. Dans les chapitres suivants, nous allons mettre en évidence les effets perceptifs.

Chapitre 3

Effet perceptif de la variation de paramètres de la structure et de l'excitation

3.1 Objectifs

Ce chapitre aborde un thème de la psychomécanique qui a déjà été traité par de nombreux auteurs (Faure et Coll. [10], McAdams et Coll. [7], Roussarie [8], Meunier et Coll. [9]); il s'agit d'évaluer l'effet de la variation de paramètres mécaniques ou géométriques d'une structure sur la perception des sons rayonnés par celle-ci. Dans l'étude présentée ici, nous étudions l'effet de la modification de trois paramètres particuliers. Le premier est lié à la structure puisqu'il s'agit de l'amortissement et les deux autres concernent l'excitation puisqu'il s'agit de la durée et du lieu d'impact.

Afin de pouvoir contrôler tous les paramètres indépendamment les uns des autres, nous travaillons avec des sons de synthèse. Les sons ont d'abord été soumis à des tests de dissemblances dans le but de trouver les dimensions perceptives sous-jacentes à ces sons. Puis, afin d'affiner la définition de ces dimensions, une méthode d'estimation directe a été utilisée afin que les auditeurs puissent évaluer l'agrément, la sensation d'amortissement perçu ainsi que la brillance des sons.

Les caractéristiques des signaux puis les protocoles des tests perceptifs sont présentés en début de chapitre. Les résultats des expériences seront développés par la suite.

3.2 Caractéristiques des signaux

La plaque étudiée est de géométrie fixe, de largeur $L_x = 35$ cm, de longueur $L_y = 50$ cm et d'épaisseur $h = 5$ mm. Ses caractéristiques mécaniques sont celles d'un acier de module d'Young $E_0 = 2.10^{11}$ Pa, de coefficient de Poisson $\nu = 0,3$, de masse volumique $\rho_p = 7800$ kg/m³. L'amortissement structural η est pris en compte dans la partie complexe du module d'Young $E = E_0(1 - i\eta)$.

La plaque bafflée et encastrée sur ses quatre côtés est immergée dans un fluide considéré comme parfait dont les propriétés mécaniques sont celles de l'air, de masse volumique $\rho_f = 1,3$ kg/m³, de célérité du son $c_f = 340$ m/s.

L'excitation, de durée limitée T est définie par la relation (2.13) présentée au chapitre 2. Dans notre cas, T est la durée d'impact totale c'est-à-dire la somme des temps de montée et de descente ($T_1 + T_2$ dans l'expression 2.13). Le champ de pression a été calculé en un point de l'espace de coordonnées $x_Q = 35$ cm, $y_Q = 50$ cm, $z_Q = 1$ m (selon le repère de la figure 2.1).

Au cours de cette étude, nous avons choisi de faire varier l'amortissement η , la durée d'impact T et le lieu d'impact S . Dix-sept signaux de 1,5 secondes ont été calculés à la fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz. La première fréquence de résonance est de 274 Hz environ. Les 70 premiers modes de la plaque ont été pris en compte si bien que la fréquence la plus élevée du spectre est autour de 8000 Hz.

Les amortissements η , les durées T et les lieux d'impact S correspondant à chaque signal sont indiqués dans le tableau 3.1.

Numéro des sons	Amortissement η	Coordonnées du lieu d'impact S	Durée d'impact (T en ms)
1	10^{-4}	$L_x/5; L_y/5$	0,1
2	$3 \cdot 10^{-4}$	$L_x/5; L_y/5$	0,1
3	$6 \cdot 10^{-4}$	$L_x/5; L_y/5$	0,1
4	10^{-3}	$L_x/5; L_y/5$	0,1
5	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$L_x/5; L_y/5$	0,1
6	$2 \cdot 10^{-3}$	$L_x/5; L_y/5$	0,1
7	$3 \cdot 10^{-3}$	$L_x/5; L_y/5$	0,1
8	$5 \cdot 10^{-3}$	$L_x/5; L_y/5$	0,1
9	10^{-2}	$L_x/5; L_y/5$	0,1
10	10^{-4}	$L_x/5; L_y/5$	0,25
11	10^{-4}	$L_x/5; L_y/5$	0,5
12	10^{-4}	$L_x/5; L_y/5$	2
13	10^{-4}	$L_x/2; L_y/2$	0,1
14	10^{-4}	$L_x/3; L_y/3$	0,1
15	10^{-4}	$L_x/4; L_y/4$	0,1
16	$5 \cdot 10^{-3}$	$L_x/5; L_y/5$	0,5
17	$2 \cdot 10^{-3}$	$L_x/2; L_y/2$	0,1

TAB. 3.1 – *Paramètres variables de chacun des sons*

L'amortissement varie de 10^{-4} à 10^{-2} , la durée d'impact de 0,1 ms à 2 ms et le lieu d'impact du centre vers le coin de la plaque.

Pour la suite, nous considérerons que le son 1 est le signal de « référence ». Il correspond à l'amortissement le plus faible (10^{-4}), dont l'impact dure 0,1 ms et dont le lieu d'impact se trouve dans un coin de la plaque en $(L_x/5; L_y/5)$. On remarque en particulier que :

- le son 9 correspond à la même excitation mais à l'amortissement le plus élevé (10^{-2}),
- les sons 10, 11 et 12 correspondent au son 1 avec une durée d'impact qui varie de 0.25 à 2 ms,
- le son 13 correspond au son 1 avec un lieu d'impact au centre de la plaque.

Les 17 signaux ont les mêmes composantes spectrales qui sont les fréquences de résonance de la plaque. Les premières fréquences ont pour valeur 274, 438, 662 et 713 Hz. Ce qui différencie les sons entre eux, ce sont les amplitudes de chaque composante spectrale. La variation de chacun des trois paramètres η , S et T entraîne une distribution différente des niveaux. L'effet de la variation de ces paramètres sur les signaux est détaillée dans le chapitre 2.

Pour les tests, les sons ont été égalisés en sonie de telle sorte à ce que ce paramètre n'entre pas en compte dans les jugements. Cette correction a été effectuée par les expérimentateurs par écoute des sons et le niveau était de l'ordre de 70 phones.

Les signaux que nous étudions sont de type "impulsionnels". Pour simplifier l'interprétation des résultats, nous allons considérer que chaque signal temporel peut être décomposé essentiellement en deux parties. La première correspond à la portion "transitoire" du signal et correspond aux 150 premières millisecondes du signal durant lesquelles le signal a l'amplitude maximale. La seconde partie correspond à la portion "résonante" du signal et comprend le signal au-delà de 150 ms.

3.3 Protocoles

Les expériences ont été réalisées dans une salle audiométrique. Les sons synthétisés par modèle physique ont été convertis en signaux acoustiques par l'intermédiaire d'une chaîne Tucker&Davis et restitués par un casque Sennheiser HD545 (voir schéma C.1 en Annexe C). Les sons ont été présentés de façon diotique.

Les sujets ont réalisé un test de dissemblances puis trois tests d'estimation directe dont les protocoles sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.3.1 Dissemblances

Ce test consiste à extraire les dimensions perceptives des 17 sons testés. Les sons étaient présentés par paires aux auditeurs qui devaient indiquer leur degré de dissemblance en déplaçant, sur un moniteur, un curseur sur une ligne allant de très semblables à très dissemblables. Les paires étaient présentées dans un seul sens, en ordre aléatoire, différent d'un auditeur à un autre. Les jugements portaient donc sur 136 paires. L'intervalle entre deux sons d'une paire était de 500 ms. L'auditeur pouvait écouter la paire autant de fois qu'il le souhaitait. En début de test, on lui faisait écouter l'ensemble des sons afin qu'il puisse utiliser toute l'échelle proposée sur le moniteur.

La durée du test était de 30 minutes environ et une pause était proposée en milieu de test. Cette méthode de comparaison par paires a entre autres été utilisée par McAdams et Coll. [7].

3.3.2 Estimation de grandeur

Trois tests d'estimation directe de grandeur ont été entrepris. Les grandeurs évaluées étaient : l'agrément, la sensation d'amortissement et la brillance des sons. La méthode d'estimation de grandeurs présente l'avantage d'offrir une durée de test relativement faible (5 minutes environ). Bouillet [26] a montré que dans le cas de la mesure de

la sonie, cette méthode donnait les mêmes résultats que ceux obtenus par une méthode d'ajustement, adaptative ou multitracking (beaucoup plus longues). Un des inconvénient est que les écarts-types résultants de la méthode d'estimation directe sont plus importants que dans le cas des autres méthodes. Un autre avantage est que cette méthode permet de mettre en évidence une relation psychophysique entre les paramètres que nous avons fait varier (l'amortissement par exemple) et les sensations engendrées.

3.3.2.1 Agrément

Pour évaluer l'agrément des 17 sons, la méthode d'estimation de grandeur introduite par Stevens [53] est celle que nous avons choisie d'utiliser. Au cours du test d'estimation d'agrément, les sons étaient présentés trois fois chacun, de façon aléatoire et sans référence. Pour chacune des 51 présentations, les sujets devaient associer à chaque son un chiffre strictement positif, proportionnel à la sensation d'agrément. Plus le son était agréable, plus le chiffre devait être grand ; inversement, plus il était désagréable, plus il devait être petit. Pour respecter la proportionnalité, si un son paraissait deux fois plus agréable que le précédent, alors le chiffre devait être deux fois plus grand que celui accordé au son précédent. Aucune gamme de réponse n'était imposée aux sujets ; ils pouvaient associer à un son un nombre aussi petit ou aussi grand qu'ils le souhaitaient.

3.3.2.2 Amortissement

L'amortissement est le principal paramètre que nous avons fait varier. Pour avoir une évaluation plus précise de sa perception, nous avons effectué un test d'estimation directe d'amortissement. La méthode utilisée était la même que celle présentée dans le paragraphe précédent. Les sujets devaient associer aux sons 1 à 9 (pour lesquels l'amortissement est la seule variable) présentés trois fois chacun aléatoirement, un chiffre proportionnel à la sensation d'amortissement. Plus le son paraissait amorti, plus le chiffre devait être grand. La difficulté de ce test, pour les sujets, était d'attribuer un chiffre important à un son bref et un chiffre faible à un son long. Ce test a été renouvelé deux fois. Les résultats de la première série n'ont pas été pris en compte, considérant ce premier test comme un entraînement.

3.3.2.3 Brillance

Afin de savoir si l'une des dimensions était corrélée à la brillance, nous avons choisi de faire estimer la brillance des 17 signaux. De même que pour l'agrément et la sensation d'amortissement, les sujets devaient associer à chaque signal un chiffre positif proportionnel à la brillance des sons. Les sons étaient présentés trois fois chacun et de façon aléatoire, soit 51 estimations au total.

3.4 Sujets

L'ensemble des sujets était des étudiants ou des membres du laboratoire et bénévoles. Pour les tests de dissemblances et d'agrément, 22 sujets ont apporté leur contribution.

Il y avait 7 femmes et 15 hommes qui étaient âgés de 15 à 60 ans sachant qu'un seul sujet était âgé de 60 ans. Pour les tests d'estimation d'amortissement et de brillance, 17 sujets dont 9 hommes et 8 femmes ont participé à l'expérience. Treize sujets parmi les 17 avaient participé à la première série d'expérience.

3.5 Résultats

3.5.1 Dissemblances

Le but de ce test était d'identifier les dimensions perceptives c'est-à-dire de trouver les critères utilisés par les sujets lors de leurs jugements.

Pour évaluer les dissemblances, les sujets déplaçaient un curseur dont la position correspondait à des abscisses qui se situaient entre 0 ("très semblables") et 1 ("très dissemblables"). Pour chaque auditeur, les dissemblances ont été regroupées dans une matrice de dissemblances symétrique 17×17 . Nous avons effectué une moyenne arithmétique des 22 matrices. À partir de la matrice ainsi obtenue, nous avons effectué une analyse multidimensionnelle des sons. Cette technique est couramment utilisée dans le domaine de la psychomécanique [10] [11] [18] [7] [8] [14] [12] mais aussi pour identifier les critères physiques relatant les différences de timbre entre les sons [54] [42] [43] [41] [55] ou alors pour évaluer les différences de qualité entre les sons [56].

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser une analyse multidimensionnelle des sons (MDS pour MultiDimensional Scaling). Elles sont décrites dans [18] [11] [41]. Pour notre étude, nous avons utilisé une MDS non métrique mise au point par Kruskal [57] [58]. L'utilisation d'une MDS non métrique implique que les paires seront ordonnées selon les valeurs des dissemblances. Tout d'abord, il s'agit de faire correspondre au mieux les disparités (ou dissemblances) à un ensemble de distances (euclidiennes) définies à l'intérieur d'un espace de Minkowski. Ensuite, le nombre de dimensions est fixé. Kruskal propose de calculer la contrainte (ou stress) associée à chaque dimension. La contrainte est la valeur normalisée de la somme des différences entre les distances et les disparités élevées au carré. Les distances doivent minimiser cette contrainte. Pour identifier le nombre de dimensions adéquat pour cette étude, nous avons utilisé la méthode dite du "coude" [41]. Elle consiste à localiser sur le graphique présentant la contrainte en fonction du nombre de dimension (ce que l'on appelle généralement l'ébouli des contraintes à cause de sa forme), la position d'un coude sur lequel deux segments se coupent de façon quasi perpendiculaire. La contrainte est minimale pour un grand nombre de dimension. Cependant, il s'agit de trouver un nombre de dimension "optimal" qui puisse expliquer au mieux les dissemblances. Ce nombre de dimension "optimal" correspondra à la position du coude. Prendre un nombre de dimension supérieur n'expliquerait guère mieux les dissemblances, ces dimensions seraient d'ailleurs difficilement interprétables. La figure D.1 en Annexe D représente l'ébouli des contraintes c'est-à-dire la contrainte calculée en fonction du nombre de dimensions dont l'espace est constitué. Nous observons un coude dont l'abscisse correspond au nombre de dimensions, ici 3, que nous allons adopter pour notre étude. Les sons ont ainsi été placés dans un espace à 3 dimensions. Les figures 3.1 et 3.2 présentent respectivement l'ensemble des sons dans les dimensions 1 et 2 puis dans les dimensions 1 et 3.

Pour l'analyse de chaque dimension, nous avons examiné l'influence des caractéristiques mécaniques correspondants aux sons, puis identifié les paramètres acoustiques et les attributs auditifs de ces sons.

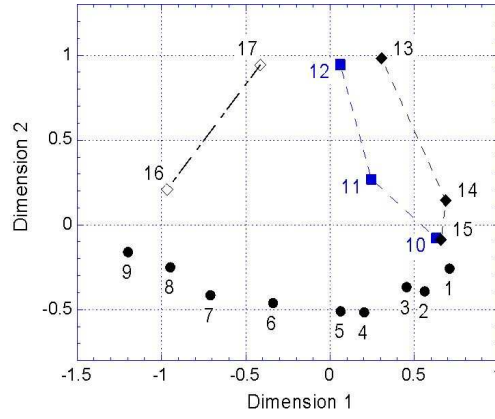


FIG. 3.1 – Position des sons dans les dimensions 1 et 2. Les cercles correspondent à une variation exclusive de l’amortissement, les carrés à une variation de la durée d’impact et les losanges pleins à une modification du lieu d’impact. Les losanges creux correspondent, quant à eux, à une variation simultanée de tous les paramètres.

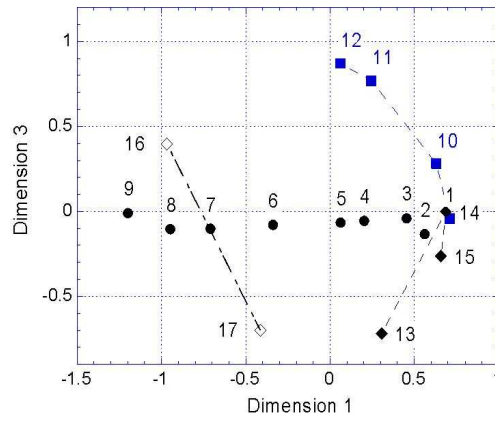


FIG. 3.2 – Position des sons dans les dimensions 1 et 3. Les cercles correspondent à une variation exclusive de l’amortissement, les carrés à une variation de la durée d’impact et les losanges pleins à une modification du lieu d’impact. Les losanges creux correspondent, quant à eux, à une variation simultanée de tous les paramètres.

3.5.1.1 Dimension 1 : Amortissement de la structure, CGS et durée des signaux et brillance des sons

Sur la figure 3.1, nous observons une répartition régulière des sons selon la dimension 1. Les sons ayant les abscisses les plus faibles (sur la gauche) correspondent aux sons les plus amortis : sons 8, 9 et 16. Inversement, les sons ayant des abscisses élevées (sur la droite) dans cette dimension correspondent aux sons les moins amortis : sons 1, 14 et 15. Nous pouvons remarquer que les sons 16 et 17 ont les mêmes abscisses que les sons 8 et 6 respectivement, pour lesquels l’amortissement a les mêmes valeurs. La dimension 1 est étroitement corrélée avec l’amortissement, variable principale de

notre étude.

En revanche, les abscisses des sons 1, 10, 11, 12 varient le long de la dimension 1 alors qu'ils correspondent à des amortissements identiques (10^{-4}). La durée d'impact est la seule variable parmi ces 4 sons. Une augmentation de la durée d'impact entraîne une atténuation des hautes fréquences, comme nous l'avons vu au chapitre 2, ce qui a un effet équivalent à une augmentation de l'amortissement.

Une remarque similaire peut être faite quant aux sons 1, 15, 14 qui n'ont pas la même abscisse pour une même valeur d'amortissement que celle du son 13. Le lieu d'impact est le seul paramètre qui varie parmi ces sons. Le son 13 correspond à un impact au centre de la plaque. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, trois composantes sur quatre ne sont pas excitées, notamment les hautes fréquences. Cela implique un décalage de la coordonnée du son 13 par rapport à celle du son 1, équivalent à une augmentation de l'amortissement.

McAdams et Coll. [7] ont montré l'influence de l'amortissement structural de barres sur le timbre des sons. En effet, ils ont mis en évidence une dimension perceptive liée à l'amortissement et à un paramètre relatant la brillance des sons à savoir le CGS.

Nous avons effectué une moyenne géométrique des estimations de brillance des auditeurs. Les sons les moins amortis ont été perçus comme étant les plus brillants. En effet, une augmentation d'amortissement engendre une atténuation des composantes hautes fréquences (voir chapitre 2). D'autre part, les sons correspondants aux durées d'impact les plus faibles sont également les plus brillants ; en effet, une augmentation de la durée d'impact engendre un renforcement du niveau des composantes basses fréquences (voir chapitre 2).

Dans notre étude, nous trouvons que la dimension 1 reflète une différence de brillance entre les sons puisqu'elle est étroitement corrélée aux estimations de brillance comme le montre la figure 3.3. Cependant, les estimations ne sont ni corrélés à la décroissance du CGS en fonction du temps (comme dans le cas de McAdams et Coll.) ni au CGS (comme dans le cas de Roussarie). Par exemple, la brillance estimée du son 12 ayant un CGS égal à 434 Hz est équivalente à celle du son 6 ayant un CGS égal à 3125 Hz. Ce qui différencie les deux sons, c'est leur durée : elle est de 1,5 s pour le son 12 alors qu'elle vaut 650 ms pour le son 6. Il semble que la durée des signaux entre en compte dans les jugements. Les différences de brillance s'expliquent par le CGS pondéré par la durée des signaux. La figure 3.4 présente la dimension 1 (cercles pleins) et les estimations de brillance (cercles vides) en fonction du produit du CGS par la durée des signaux. Nous constatons que la croissance est linéaire jusqu'à une valeur de 3000 Hz.s. Les résultats tendent ensuite vers une asymptote. Du dernier graphique, résulte la conclusion suivante : un son long dont le CGS est faible a la même brillance perçue qu'un son court dont le CGS est élevé.

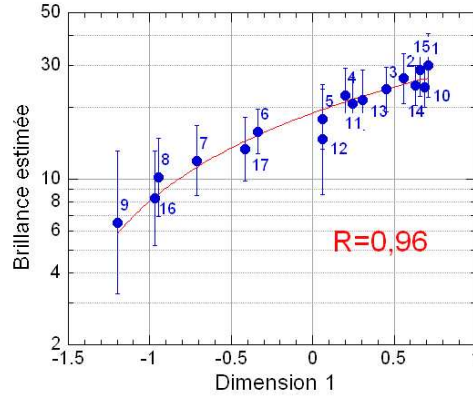


FIG. 3.3 – Estimations de brillance en fonction de la dimension 1. Les barres verticales présentent les écarts-types.

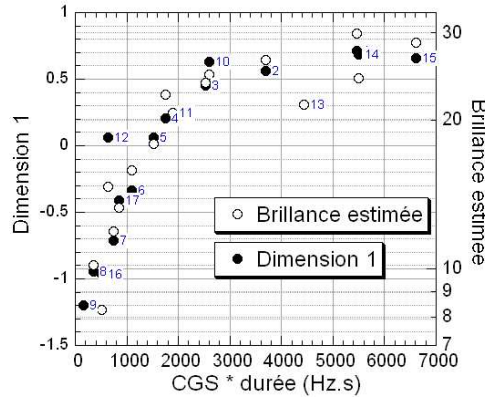


FIG. 3.4 – Dimension 1 (cercles pleins) et brillance estimée (cercles vides) en fonction du produit du CGS par la durée des signaux.

La dimension 1 peut être également interprétée en terme de sonie spécifique. Pour quantifier l'effet des composantes de hautes fréquences sur la dimension 1, nous avons calculé la sonie spécifique entre la bande de Bark 17 et la bande 24. Ce calcul a été effectué sur l'ensemble des sons, excepté les sons 6 à 9 qui n'ont plus d'énergie dans ces bandes de Bark. La sonie spécifique a été intégrée sur la partie résonante du signal. La figure 3.5 présente la position des sons selon la dimension 1 en fonction des valeurs de la sonie spécifique en sonnes intégrée sur le temps entre les bandes de Bark 17 et 24. Une régression linéaire montre que ces deux grandeurs sont corrélées ($R=0,98$).

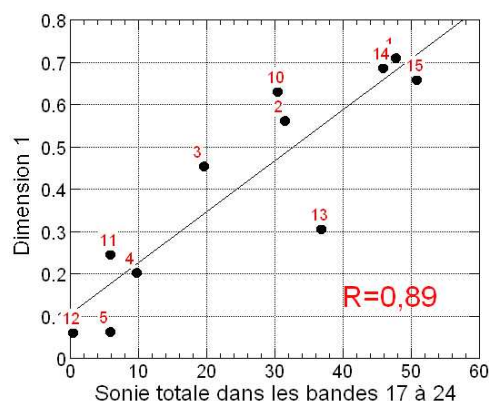


FIG. 3.5 – Dimension 1 et sonie spécifique sur la partie résonante intégrée sur le temps entre les bandes de Barks 17 et 24.

Pour les sons 1 à 9, regardons les résultats des jugements d'amortissement perçu par rapport à la dimension 1. D'une part, on observe à la figure 3.6 que la moyenne géométrique de l'ensemble des estimations des 17 sujets est corrélée à la dimension 1. D'autre part, la corrélation entre l'amortissement estimé et celui de la structure est de 0,98 comme l'indique la figure 3.7. Nous avons souhaité relier cette sensation d'amortissement à une grandeur physique liée au signal, plus précise que la sonie spécifique calculée dans les bandes 17 à 24. Par conséquent, nous avons calculé le "taux de décroissance" de niveau pour chaque signal. Ce paramètre représente le coefficient directeur de la décroissance temporelle de niveau en décibels. La figure 3.7 présente simultanément les estimations d'amortissement et le taux de décroissance en dB.s^{-1} en fonction de l'amortissement de la structure. Les cercles pleins correspondent aux pentes et les cercles vides aux estimations. Les points sont quasiment tous confondus. Lors de leurs jugements, les sujets ont donc respecté une échelle proportionnelle au taux de décroissance.

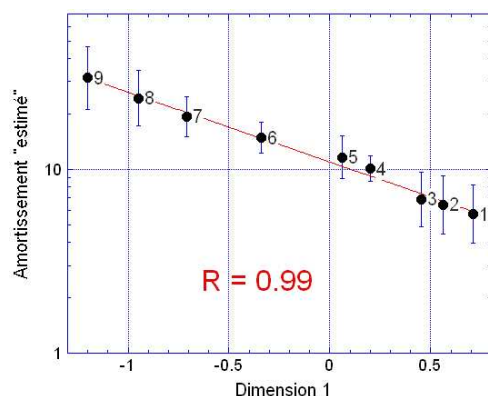


FIG. 3.6 – Amortissement estimé et dimension 1, pour les sons 1 à 9.

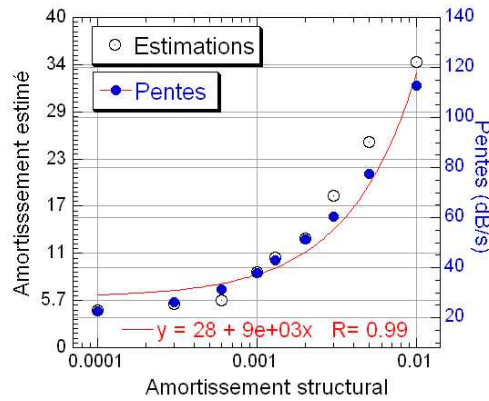


FIG. 3.7 – Amortissement estimé (cercles vides) et pentes ou "taux de décroissance" (cercles pleins) en fonction de l'amortissement structural.

3.5.1.2 Dimension 2 : Paramètres de l'excitation, sonie spécifique dans le Bark 3 et tonalité des sons dans la partie résonante

La dimension 2 présente une répartition des sons qui laisse supposer l'influence de deux facteurs : la durée d'impact et le lieu d'impact. En effet, si l'on observe la figure 3.1 nous constatons qu'une augmentation de la coordonnée des sons selon la dimension 2 correspond à une augmentation de la durée d'impact. Le son 12 est associé à une durée d'impact de 2 ms alors que les sons 1 à 9 correspondent à des durées de 0,1 ms. En ce qui concerne le lieu d'impact, une augmentation des coordonnées correspond à un déplacement de l'excitation du coin vers le centre. Les sons 17 et 13 sont définis par des excitations au centre de la plaque alors que les sons 1 à 9 sont définis par des excitations dans un coin de la plaque.

D'un point de vue physique, nous pouvons observer les représentations temps-fréquences de la densité de sonie des sons 1, 11 et 12 sur la figure 3.8.

Les sons 1, 11 et 12 sont représentatifs de la distribution des sons selon la dimension 2.

Le son 12, à une extrémité de la dimension 2, est purement de basse fréquence ayant 3 composantes principales à 272, 424 et 662 Hz. Sa réponse "sensorielle" est limitée entre les bandes de Barks 3 et 9. Un tel type de densité de sonie donne la sensation d'une note basse fréquence similaire à celle d'un instrument de musique. Le son 1, à l'autre extrémité de la dimension, est plutôt riche en hautes fréquences.

Le son 11 situé au centre de la dimension 2 a de l'énergie dans les moyennes fréquences. Le son 5 situé à cette même extrémité de la dimension 2 a peu d'énergie en basses fréquences.

Les sons 13 et 17 ont la même coordonnée que le son 12 et pourtant ne sont pas des sons purement basses fréquences. Ils ont un peu d'énergie en basse fréquence. Mais cette contribution est présente durant toute la durée du signal. Alors que la contribution des hautes fréquences est rapidement absorbée. Les sons 13 et 17 ont un caractère tonal équivalent à celui du son 12. Les sons 12, 13 et 17 correspondent à des impacts au centre de la plaque ou à des durées d'impact élevées.

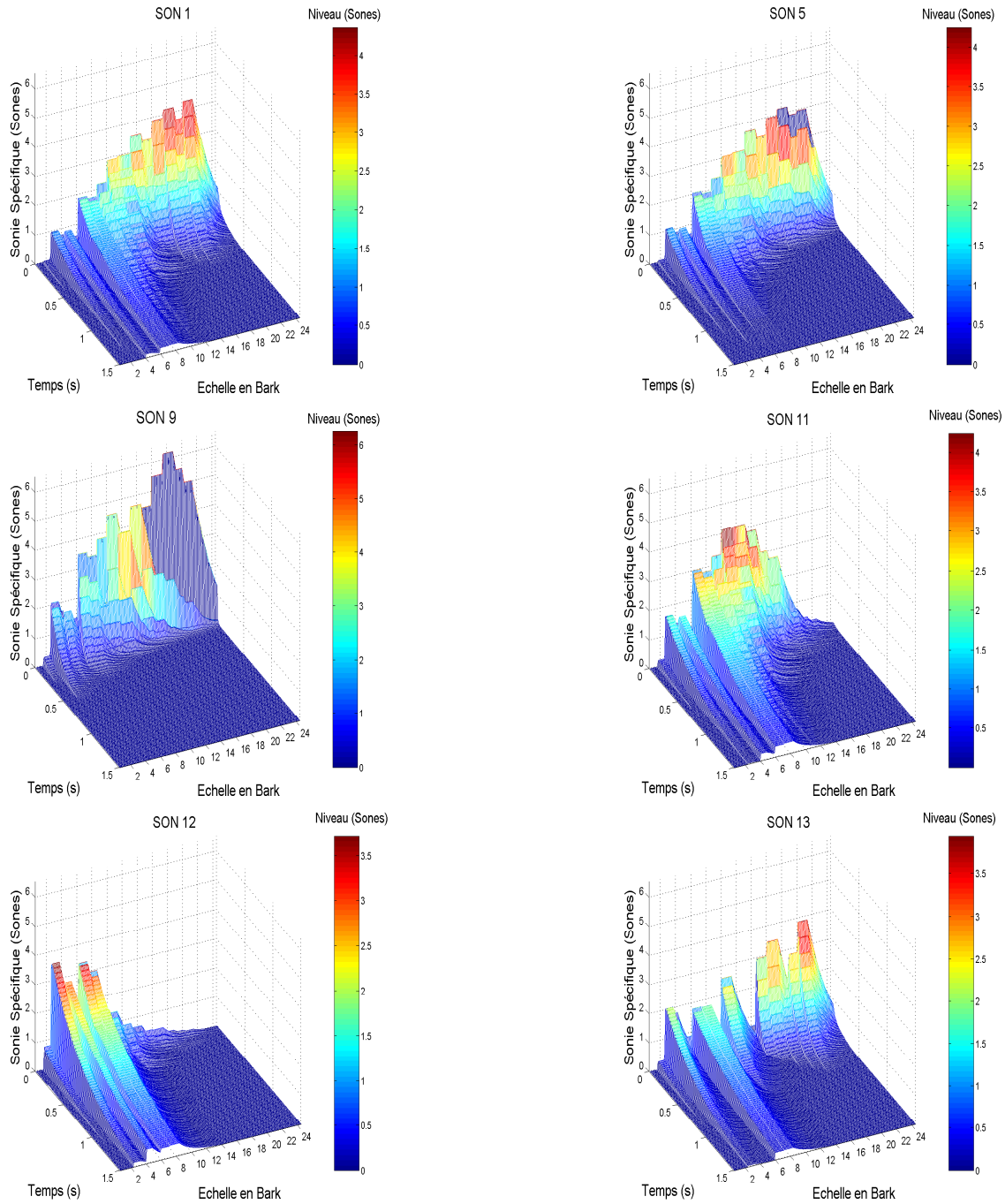


FIG. 3.8 – Temps-fréquence sensoriels

Ces deux conditions produisent le même effet perceptif : une composante basse fréquence est présente pendant toute la durée du signal. Cette composante basse fréquence correspond à la fréquence fondamentale de la plaque.

Ainsi, nous avons tracé sur la figure 3.9 la sonie spécifique des sons 5, 11 et 12 moyennée sur la partie résonante (au delà de 150 ms) suivant l'échelle des Barks. D'une manière générale, nous constatons que ces sons sont très pauvres dans les bandes de Barks 15 à 24. Si nous observons la densité de sonie répartie dans les bandes 1 à 10 et plus précisément dans la bande 3, nous constatons que l'énergie est croissante du son 5 au son 12.

Subjectivement, l'écoute des sons conduit à penser que la dimension 2 est corrélée à la présence d'un caractère tonal dans les sons. D'un point de vue perceptif, nous avons quantifié la qualité tonale basse fréquence des sons, en intégrant la sonie spécifique après 150 ms dans la bande de Bark 3. La figure 3.10 présente la corrélation entre la dimension 2 et la densité de sonie spécifique dans le Bark 3.

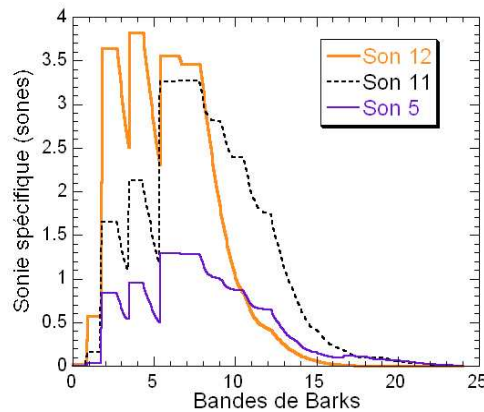


FIG. 3.9 – Sonie spécifique moyennée au-delà de 150 ms pour les sons 5, 11 et 12.

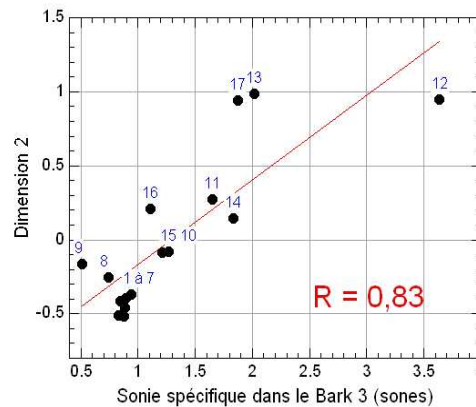


FIG. 3.10 – Dimension 2 et sonie spécifique dans la 3^{ème} bande de Bark au delà de 150 ms

3.5.1.3 Dimension 3 : paramètres de l'excitation, acuité et brillance de la partie transitoire des sons

La dimension 3 est reliée à la partie transitoire du signal non mise en évidence dans les résultats précédents. Sur la figure 3.2, les sons 13 et 17 qui occupent une extrémité de la dimension 3 correspondent à des impacts au centre de la plaque. A l'autre extrémité, nous retrouvons les sons 11 et 12 qui correspondent à des impacts dans un coin mais aussi à des durées d'impact élevées. Suivant la dimension 3, il y a à nouveau interaction entre la variation du lieu et de la durée d'impact.

La dimension 3 est corrélée aux caractéristiques spectrales des signaux mais seulement sur la partie transitoire. Les distances entre les ordonnées des sons 13, 1, 10 et 12 est reliée à la place du maximum d'énergie suivant l'échelle des barks au début des sons. A la figure 3.8, sur les 100 premières millisecondes, le son 12 a son maximum d'énergie dans les basses fréquences. En revanche, le son 13 a son maximum d'énergie dans les hautes fréquences. La figure 3.11 présente la sonie spécifique des sons 12, 5 et 13 moyennée sur les 100 premières millisecondes. Le son 12 a très peu d'énergie dans les bandes de Bark 10 à 24 contrairement aux sons 5 et 13. Les coordonnées des sons dans la dimension 3 sont étroitement reliées à la bande de Bark correspondant au maximum d'énergie. L'acuité calculée sur les 100 premières millisecondes a été associée à la dimension 3. La figure 3.12 montre la corrélation entre la dimension 3 et l'acuité dite "initiale".

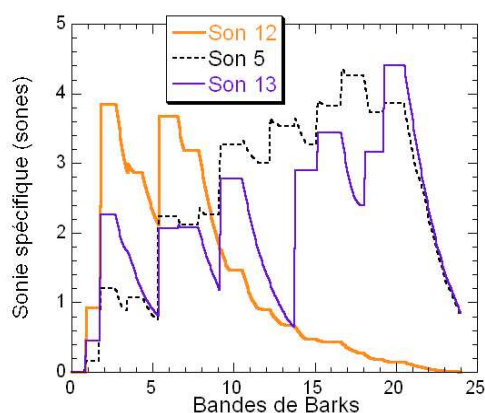


FIG. 3.11 – Sonie spécifique moyennée sur les 100 premières millisecondes des sons 12, 5 et 13

La dimension 1 relate une différence de timbre entre les sons. La seconde dimension est corrélée à une qualité tonale des signaux sur la partie résonante. La dimension 3 est liée à l'acuité de la partie transitoire des signaux.

3.5.2 Agrément

Les sujets ont affecté à chaque son, trois estimations d'agrément. Nous avons effectué une moyenne géométrique de l'ensemble des jugements des 22 sujets.

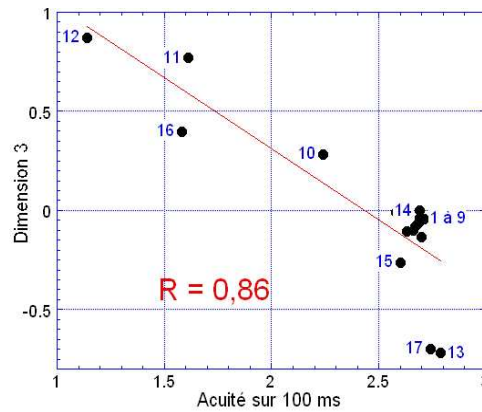


FIG. 3.12 – Dimension 3 et acuité des sons calculée sur les 100 premières millisecondes de signal

3.5.2.1 Effet de la variation de l'amortissement sur l'agrément

Une observation des estimations des sons 1 à 9, sujet par sujet, met en évidence deux groupes de sujets : un groupe de 11 sujets (groupe G2) qui a préféré les sons les moins amortis et un autre de 11 (groupe G1) qui a préféré les sons les plus amortis. La figure 3.13 montre la moyenne géométrique des estimations de chaque groupe en fonction de l'amortissement. Pour pouvoir valider cette constatation, nous avons procédé à une classification hiérarchique des sujets. Nous avons choisi d'étudier le logarithme des estimations normalisées (jugement maximal égal à 1 pour chaque sujet) des sons 1 à 9. Ce sont les sons pour lesquels l'amortissement est la seule variable entrant en compte. Les résultats de cette classification sont présentés en figure 3.14.

Le but de la classification hiérarchique est de fusionner des classes pour lesquelles un critère est respecté. La règle d'agrégation (ou critère) que nous avons choisie se base sur la méthode de Ward qui consiste à minimiser l'inertie intraclasse (ou à maximiser l'inertie interclasse). Chaque sujet est représenté par un vecteur dont les composantes sont les nombres attribués aux sons. Des mesures de distances sont effectuées entre ces vecteurs. Les distances que nous avons choisies de mesurer sont les distances euclidiennes. Au départ, chaque sujet forme une classe. Les deux classes les plus proches sont recherchées à chaque itération. Plusieurs sujets peuvent être ainsi regroupés suivant le critère de Ward. Ensuite ce sont deux groupes de sujets qui vont être regroupés jusqu'à l'obtention d'un seul groupe. A chaque regroupement correspond un niveau d'agrégation (ou distance entre les sujets).

Sur la figure 3.14, nous constatons que l'arbre comporte essentiellement deux parties. La partie de gauche contient les sujets qui ont préféré les sons les plus amortis (G1). La partie de droite représente ceux qui ont préféré les sons les moins amortis (G2). Un niveau d'agrégation important signifie une forte démarcation entre les deux groupes.

Des échanges verbaux avec les sujets (à l'aide d'un questionnaire) après les tests nous ont permis d'identifier le comportement des deux groupes. Les sujets du groupe 1 ont trouvé les sons les moins amortis comme étant "dissonants", trop brillants voire

gênants. En fait, mécaniciens en majorité, ils ont jugé d'une part la qualité de la structure à travers l'écoute des sons. Plus les sons étaient brefs, plus ils semblaient provenir d'une structure rigide, plus la qualité de cette structure leur paraissait bonne. D'autre part, les sons les moins amortis leur paraissaient plutôt agressifs, gênants. En revanche, les sujets du groupe 2 ont préféré les sons les moins amortis car ils étaient justement beaucoup plus riches que les autres. Ces sons représentaient, pour eux, un intérêt musical. Les sujets de ce groupe étaient en effet soit musiciens soit mélomanes.

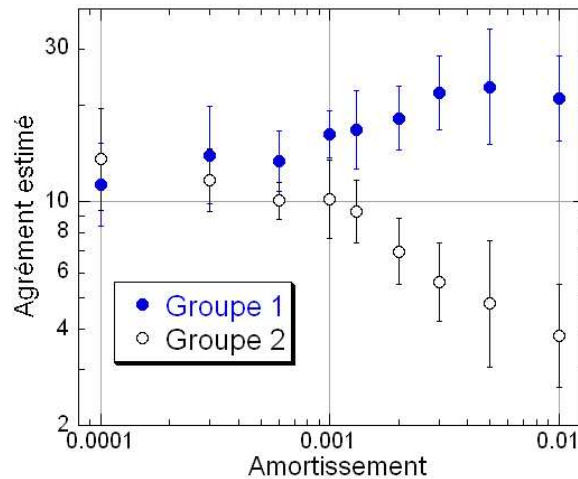


FIG. 3.13 – Agrément en fonction de l'amortissement pour les deux groupes de sujets. Les barres verticales représentent les écarts-types.

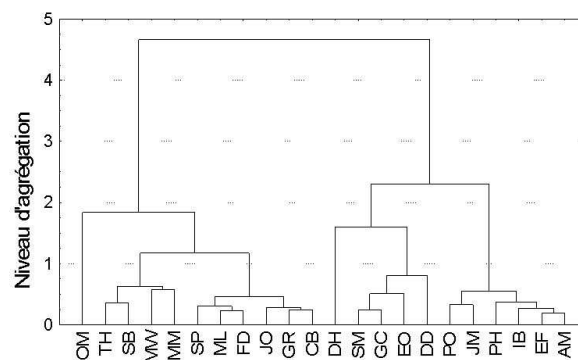


FIG. 3.14 – Classification hiérarchique des sujets pour les estimations d'agrément

3.5.2.2 Effet de la variation de la durée et du lieu d'impact sur l'agrément

Pour mettre en évidence les paramètres de l'excitation, les résultats des deux groupes ont été traités indépendamment puisque les critères utilisés par chaque groupe étaient

différents.

Une première observation des résultats bruts montrait que les deux groupes de sujets préféraient les sons pour lesquels les durées d'impact étaient élevées ainsi que ceux qui correspondant aux excitations au centre de la plaque. Cependant, les critères de jugements pour les sons 10 à 17 étaient également différents pour les deux groupes de sujets. Pour les sujets du groupe 1, préférant les sons les plus amortis, plus les sons étaient brillants, moins les sons étaient agréables. Pour juger l'agrément, ces sujets ont évalué l'inverse de la gêne.

Les jugements sont corrélés (par régression linéaire $R=0,82$), à la figure 3.15, au CGS (défini au chapitre 1) ; ce qui montre que les sujets ont estimé l'inverse de la gêne. En revanche, les jugements des sujets du groupe 2, préférant les sons les moins amortis, sont corrélés à la figure 3.16 au taux de décroissance des sons (pente). Leur critère d'agrément était lié à la décroissance plus ou moins rapide des sons. Moins les sons étaient amortis, plus ils étaient agréables.

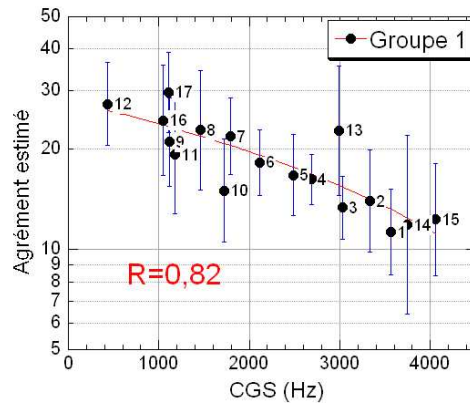


FIG. 3.15 – Agrément estimé par le groupe 1 en fonction du centre de gravité spectral.

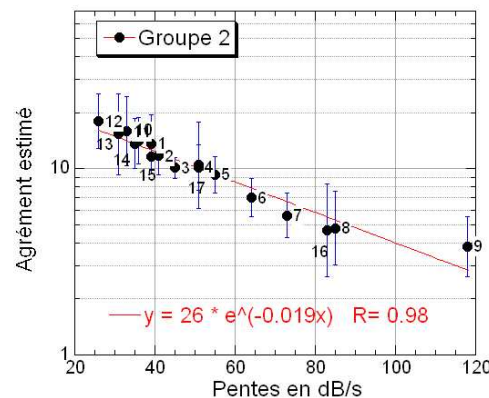


FIG. 3.16 – Agrément estimé par le groupe 2 en fonction de la pente des sons ou "taux de décroissance".

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les relations entre les paramètres mécaniques de la plaque et de l'excitation, les paramètres acoustiques des signaux puis les paramètres perceptifs des sons. Tout d'abord, ces relations ont été établies à l'aide de tests de dissemblance qui mettent en évidence, à l'aide d'une analyse multidimensionnelle, les dimensions sous-jacentes relatant les différences entre les sons. Enfin, les tests d'estimation d'agrément ont mis en évidence les paramètres mécaniques et acoustiques influençant la qualité des sons.

L'effet de la variation de l'amortissement, du lieu et de la durée d'impact sur les jugements de dissemblances, d'agrément, d'amortissement et de brillance des sons a donc été montré. Trois dimensions perceptives ont été identifiées.

La dimension 1 relate une différence de timbre entre les sons puisqu'elle est corrélée aux estimations de brillance. Le paramètre physique associé à cette dimension est le produit du centre de gravité spectral par la durée des sons. Cette dimension peut également s'interpréter en terme de sonie spécifique sur la partie résonante entre les Barks 17 et 24. Cette dimension est essentiellement liée aux variations d'amortissement ; elle est également corrélée aux estimations d'amortissement pour les sons 1 à 9. Le rôle prépondérant de l'amortissement avait été mis en évidence par de nombreux auteurs (Roussarie [8], Faure [11], McAdams et Coll. [7]). Notre résultat rejoint celui de McAdams et Coll. [7] qui ont montré que la variation d'amortissement avait un effet sur le timbre des signaux dans le cas de sons d'impact.

La seconde dimension est liée à une qualité tonale des signaux. Elle est corrélée à la sonie spécifique dans la troisième bande de Bark sur la partie résonante due à la présence du premier partiel. Elle relate essentiellement les variations de la durée et du lieu d'impact. C'est un résultat similaire à celui de Meunier et Coll. [9] qui ont trouvé une dimension liée à une balance spectrale entre l'amplitude du premier partiel et celle des autres harmoniques. Quant à la troisième dimension, elle met en évidence la différence de brillance sur la partie transitoire des signaux. Elle est corrélée à l'acuité calculée sur les 100 premières millisecondes. Cette dimension est également liée essentiellement aux paramètres de l'excitation.

Pour les jugements d'agrément, deux groupes de sujets ont été mis en évidence. Globalement, les sujets du premier groupe jugeaient agréables les sons les plus amortis car ils étaient moins brillants. C'est pourquoi les estimations de ce groupe sont corrélées au CGS des sons. Alors que pour les sujets du second c'était l'inverse, plus ils étaient longs, plus ils étaient agréables car ils présentaient un intérêt musical. C'est pourquoi leurs résultats sont liés au taux de décroissance des sons. Faure [11] avait également obtenu deux groupes de sujets lors d'un test de préférence de sons transmis à travers des plaques en verre ayant différentes valeurs de module d'Young. Les résultats d'un groupe de sujet étaient liés à la sonie, alors que les résultats du second étaient liés au décalage des fréquences propres (les sujets préférant les sons les plus mâts). Nos résultats d'agrément ne sont pas corrélés à une dimension perceptive contrairement à ce qu'avait montré Faure.

Les résultats de ce chapitre permettront de mieux comprendre les différences perceptives entre signaux enregistrés et synthétisés dont le sujet sera abordé au chapitre 5.

Chapitre 4

Perception des sons de plaques d'épaisseurs variables

L'une des applications de la psychomécanique est de déterminer jusqu'où l'on peut simplifier la modélisation d'une structure complexe pour obtenir des sons qui restent proches, d'un point de vue perceptif.

Plusieurs auteurs ont déjà montré l'effet de la variation d'épaisseur d'une barre (Lakatos et Coll. [17]) ou d'une plaque (Faure et Marquis-Favre[10]). Dans le cas de ces études, l'épaisseur de chaque structure était constante.

Dans l'étude présentée dans ce chapitre, nous examinons le cas de la modélisation du rayonnement de plaques d'épaisseur variable. On considère, en effet, l'exemple d'une plaque d'épaisseur variable que l'on cherche à modéliser par une plaque d'épaisseur constante.

Cette étude se décompose en plusieurs étapes qui sont présentées au schéma 4.1. Le problème était de savoir si un son rayonné par une plaque d'épaisseur variable pouvait être perçu comme similaire à un son rayonné par une plaque d'épaisseur constante, "équivalente". Si oui, quel est le critère perceptif d'équivalence ? Puis, quelle est l'épaisseur équivalente associée ? Mais aussi, dans le cas défavorable où la similarité n'est pas effective entre les deux types de sons, quel est le critère perceptif de dissemblance ?

L'épaisseur est ainsi la seule variable de notre problème. Dans notre cas, les plaques d'épaisseur variables sont des plaques "bosselées".

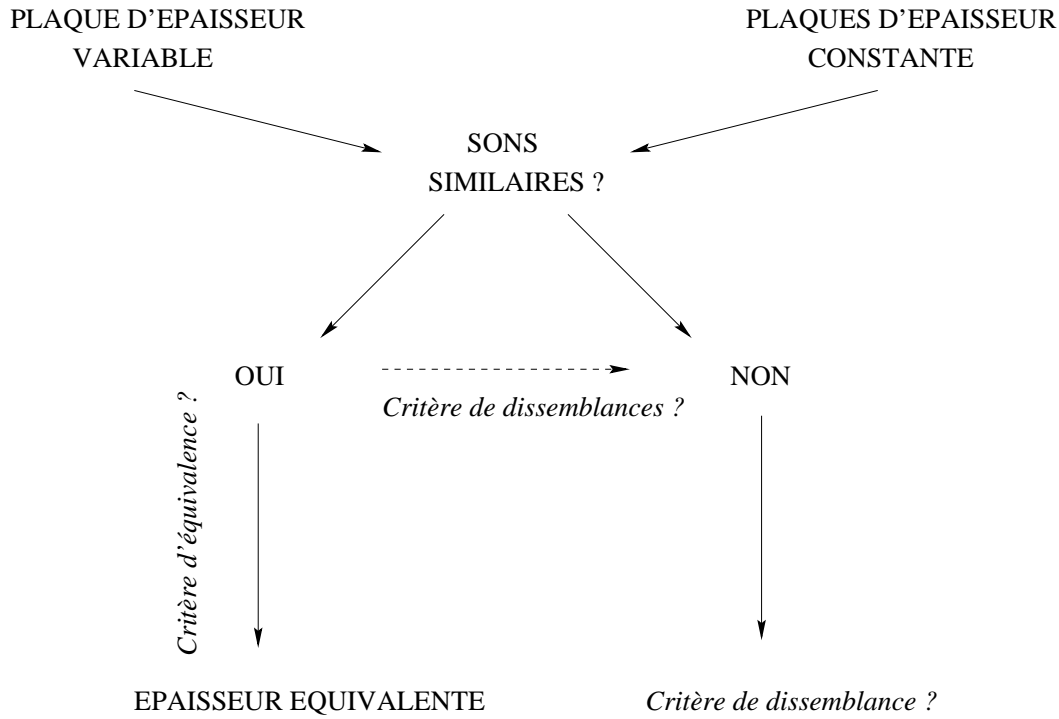


FIG. 4.1 – Objectif : détermination d'une épaisseur de plaque équivalente dont le son rayonné serait similaire à celui d'une plaque d'épaisseur variable.

4.1 Modèle pour une plaque d'épaisseur variable

L'exemple choisi est celui de trois géométries de plaques à 1, 4 et 9 bosses. Les plaques sont de dimensions $35 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$. L'épaisseur des plaques a été modélisée de la façon suivante : elles ont une épaisseur minimum de base h de 5 mm (épaisseur de la plaque sans les bosses) à laquelle s'ajoute une épaisseur variable $EP(x, y)$ de valeur maximale 1 ou 2 mm. Les plaques bosselées ont donc des épaisseurs maximales de 6 ou 7 mm. L'épaisseur totale de la plaque $h(x, y)$ est donnée par la formule suivante :

$$h(x, y) = h + EP(x, y), \quad (4.1)$$

où $EP(x, y)$, fonction qui décrit la forme et l'amplitude des bosses, est définie par la relation 4.2.

$$EP(x, y) = \left\{ \left[\left[\frac{2(x-a)-L}{L} \right]^2 + 1 \right]^2 \left[1 + \cos\pi \left[\frac{2(x-a)-L}{L} \right] \right] \right\} \\ \left\{ \left[\left[\frac{2(y-a)-L}{L} \right]^2 + 1 \right]^2 \left[1 + \cos\pi \left[\frac{2(y-a)-L}{L} \right] \right] \right\} \quad (4.2)$$

L et a sont des coefficients qui dépendent de la géométrie du problème :

L =(borne supérieure du sous-domaine) - (borne inférieure du sous-domaine),

a =borne inférieure du sous-domaine.

Les sous-domaines sont définis ci-après.

Pour la plaque à 1 bosse, $h(x, y)$ a été appliquée sur toute la plaque (soit 1 sous-domaine).

Pour la plaque à 4 bosses, $h(x, y)$ a été appliquée sur quatre sous-domaines de définition :

$$\left[\frac{-L_x}{2} \ 0 \right] \times \left[\frac{-L_y}{2} \ 0 \right] ; \left[0 \ \frac{+L_x}{2} \right] \times \left[0 \ \frac{+L_y}{2} \right] ; \left[\frac{-L_x}{2} \ 0 \right] \times \left[0 \ \frac{+L_y}{2} \right] ; \left[0 \ \frac{+L_x}{2} \right] \times \left[\frac{-L_y}{2} \ 0 \right] ;$$

où L_x et L_y sont respectivement les largeur et longueur de la plaque. Les quatre "sous-domaines", de même taille, sont présentés à la figure 4.2.

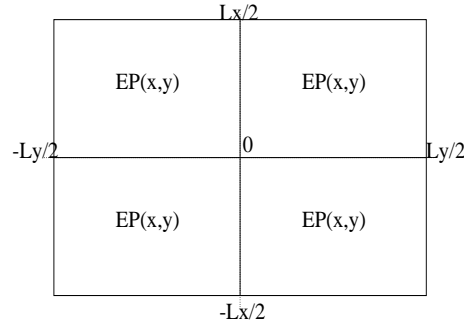


FIG. 4.2 – Cas de la plaque à 4 bosses : 4 sous-domaines de définition

Pour la plaque à 9 bosses, la fonction $h(x, y)$ a été appliquée sur neuf sous-domaines de définition, de même taille, comme le montre la figure 4.3.

Dans tous les cas, la plaque est soumise à une excitation (définie par la relation 2.13) dont la durée d'impact totale est de 0,1 ms.

Deux points d'excitation ont été choisis : la position 1 a pour coordonnées $x_s=24,5$ cm et $y_s=35$ cm, la position 2 a pour coordonnées $x_s=19,5$ cm et $y_s=35$ cm.

Les 70 premiers modes de la plaque ont été pris en compte dans le calcul, ce qui correspond à des spectres répartis sur 0-8000 Hz environ. Le champ de pression a été calculé en un point situé au-dessus de la plaque de coordonnées $x_m=17$ cm, $y_m=23$ cm

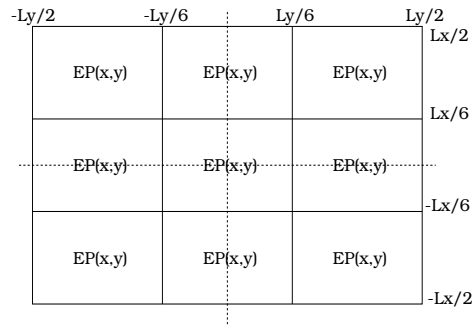


FIG. 4.3 – Cas de la plaque à 9 bosses : 9 sous-domaines de définition

et $z_m=1$ m.

4.2 Similarité entre sons de plaques d'épaisseur variable et sons de plaques d'épaisseur constante

Des tests de similarité entre un son de plaque d'épaisseur variable et différents sons de plaque d'épaisseur constante ont été menés. Le but est de savoir s'il existe un minimum de dissemblance (ou maximum de similarité), de déterminer quels sont les critères perceptifs de dissemblance et de connaître la valeur de l'épaisseur constante équivalente.

4.2.1 Sons de l'étude

Notre étude a porté sur 5 sons particuliers de plaques bosselées (sons de référence), présentés au tableau 4.1, ce qui a donné lieu à 5 tests de similarité portant chacun sur un seul des 5 sons. Les sons rayonnés par des plaques bosselées sont notés : $Bnam-il$ où n correspond au nombre de bosses ($n=1, 4$ ou 9), m correspond à l'épaisseur maximale ($m=6$ ou 7) et l correspond à la position du point d'impact ($l=1$ ou 2).

Noms des sons	Géométrie des plaques (nombre de bosses)	Epaisseur maximale (mm)	Position de l'impact
B1a6-i1	1	6	1
B4a6-i1	4	6	1
B9a6-i1	9	6	1
B4a6-i2	4	6	2
B4a7-i1	4	7	1

TAB. 4.1 – Sons de plaques bosselées

Chaque test a consisté à comparer un des 5 sons à N sons correspondant à N plaques d'épaisseur constante. La variable de chaque test était l'épaisseur des plaques homogènes. Ces N sons ont été choisis de la façon suivante : une écoute préalable des sons de plaques homogènes de différentes épaisseurs nous a permis de choisir l'étendue des

variations d'épaisseur à considérer pour chaque test (c'est-à-dire pour la comparaison avec un son de plaque bosselée). Notre critère était de déterminer le son de plaque homogène qui nous paraissait le plus proche du son de plaque bosselée et de faire varier l'épaisseur des plaques homogènes autour de cette valeur. A chaque son de plaque bosselée, un groupe de N sons de plaques homogènes a été déterminé et correspond à un intervalle d'épaisseur de plaque. Par exemple, un son équivalent au son B4a6-i1, s'il existe, nous semblait provenir d'une plaque d'épaisseur appartenant à l'intervalle [5,14 5,34 mm]. C'est ainsi que nous avons défini 4 groupes de sons de plaques d'épaisseur constante. Les sons rayonnés par des plaques d'épaisseur constante sont notés : $Cn-il$ où n correspond à la valeur de l'épaisseur exprimée en centaines de millimètres et l correspond à la position du point d'impact ($l=1$ ou 2).

Les groupes de sons sont les suivants :

- Le groupe de sons 1 associé aux sons B4a6-i1, B1a6-i1 et B9a6-i1 est composé des sons : C514-i1, C516-i1, C518-i1, C520-i1, C522-i1, C524-i1, C526-i1, C528-i1, C530-i1, C532-i1, C534-i1.
- Le groupe de sons 2 associé au son B4a6-i1 testé une seconde fois est composé des sons : C450-i1, C500-i1, C504-i1, C508-i1, C510-i1, C512-i1, C516-i1, C520-i1, C524-i1, C528-i1, C532-i1, C536-i1, C544-i1, C550-i1.
- Le groupe de sons 3 associé au son B4a6-i2 est composé des sons : C450-i2, C500-i2, C504-i2, C508-i2, C510-i2, C512-i2, C516-i2, C520-i2, C524-i2, C528-i2, C532-i2, C540-i2, C550-i2.
- Le groupe de sons 4 associé au son B4a7-i1 est composé des sons : C500-i1, C508-i1, C512-i1, C516-i1, C520-i1, C524-i1, C528-i1, C532-i1, C540-i1, C544-i1, C548-i1, C552-i1, C556-i1, C560-i1.

Les différents groupes de sons sont les sons de comparaison.

4.2.2 Sujets

Deux séries de tests ont été menées. Au cours de la première série de tests, les sons B9a6-i1, B4a6-i1 et B1a6-i1 ont été testés. Pour la seconde série, réalisée dans un second temps, ce sont les sons B4a6-i2 et B4a7-i1 qui ont été testés. Le son B4a6-i1 a été à nouveau testé car dans la première série l'intervalle d'épaisseur choisi n'était pas suffisamment grand.

Dans la première série de tests, il y avait 14 sujets dont 7 hommes et 7 femmes âgés de 23 à 60 ans. Dans la seconde série, il y avait 14 sujets dont 8 hommes et 6 femmes âgés de 20 à 60 ans. Huit sujets ont effectué les deux séries.

Les sujets étaient des étudiants et membres du laboratoire, tous bénévoles.

4.2.3 Protocole

Le protocole utilisé pour évaluer les dissemblances était le même que celui présenté au paragraphe 3.3 du chapitre 3.

Au cours d'un test, les sujets évaluaient la similarité entre un son de plaque bosselée et N sons de plaques d'épaisseur constante. Avant chaque test, une première écoute des sons était proposée afin que les auditeurs puissent se familiariser avec les sons. Les paires, leur ordre de passage et l'ordre de passage des sons dans chaque paire

étaient aléatoires. La durée des sons était de 2 secondes. L'intervalle entre les sons de chaque paire était de 200 ms. La paire suivante était présentée suite à la validation par l'auditeur de son jugement, après un intervalle de temps de 500 ms. La durée d'un test était de l'ordre de 3 minutes.

Chaque test a été renouvelé une fois par sujet.

4.2.4 Résultats

Les dissemblances évaluées par les sujets ont été traduites en un nombre qui s'étend de 0 pour très semblables à 6 pour très dissemblables. Le chiffre 3 signifiant que les sons étaient moyennement semblables.

Les figures 4.4 et 4.5 présentent les moyennes arithmétiques des jugements de dissemblance entre les sons B9a6-i1, B1a6-i1 respectivement de plaques bosselées et chaque son du groupe 1. L'abscisse correspond à l'épaisseur (constante) des plaques choisies pour calculer les sons de comparaison. La figure 4.6 présente les dissemblances moyennées entre le son B4a6-i1 et les sons du groupe 1 (en tirets) puis les sons du groupe 2 (en trait plein) en fonction de l'épaisseur des plaques homogènes. Les figures 4.7 et 4.8 présentent respectivement la moyenne arithmétique des jugements de dissemblance en fonction de l'épaisseur des plaques, entre le son B4a6-i2 et les sons du groupe 3 puis entre le son B4a7-i1 et ceux du groupe 4. Les barres verticales sur les figures représentent les écarts-types.

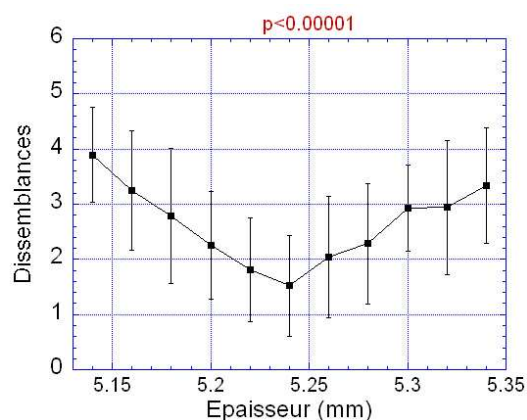


FIG. 4.4 – Dissemblances entre le son B9a6-i1 et les sons du groupe 1 en fonction de l'épaisseur des plaques homogènes

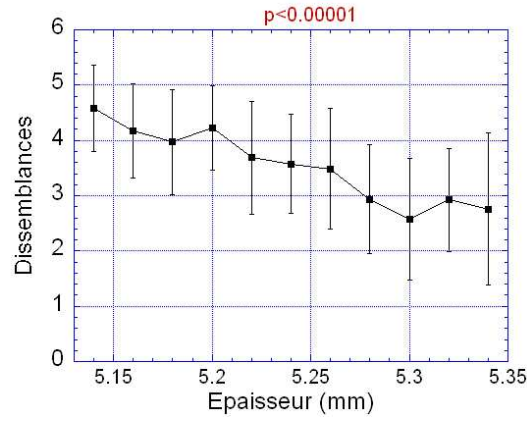


FIG. 4.5 – Dissemblances entre le son B1a6-i1 et les sons du groupe 1 en fonction de l'épaisseur des plaques homogènes

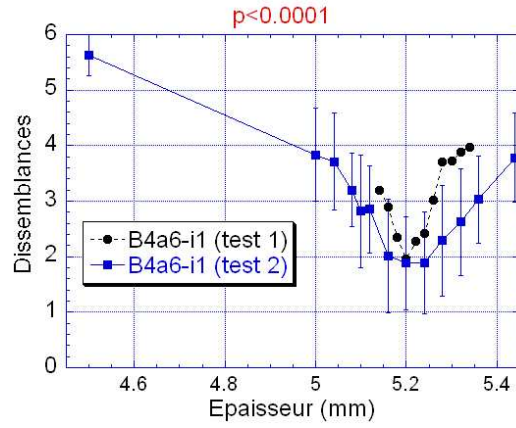


FIG. 4.6 – Dissemblances entre le son B4a6-i1 et les sons du groupe 1 (en tirets) puis les sons du groupe 2 (en trait plein) en fonction de l'épaisseur des plaques homogènes

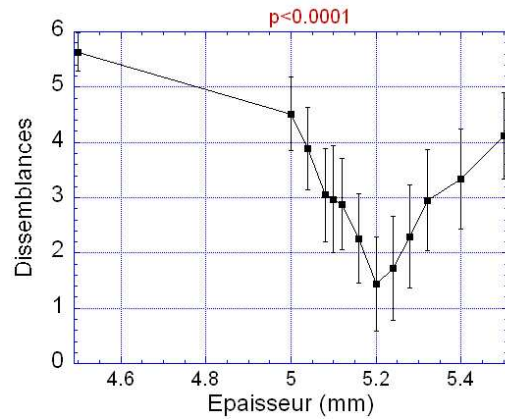


FIG. 4.7 – Dissemblances entre le son B4a6-i2 et les sons du groupe 3 en fonction de l'épaisseur des plaques homogènes

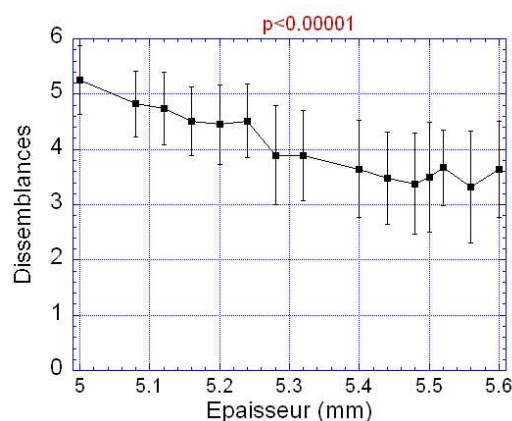


FIG. 4.8 – Dissemblances entre le son B4a7-i1 et les sons du groupe 4 en fonction de l'épaisseur des plaques homogènes

Les courbes ont globalement une forme en "V" pour les sons B9a6-i1, B4a6-i1 et B4a6-i2, ce qui montre que pour ces tests, un son de plaque d'épaisseur constante a été jugé plus proche que les autres du son de référence testé. L'analyse de variance montre que la variation de l'épaisseur a un effet significatif sur les dissemblances ($p < 10^{-4}$). Par contre, on ne trouve pas de minimum marqué de dissemblance pour les sons B1a6-i1 et B4a7-i1 bien que l'effet de l'épaisseur soit ici aussi significatif ($p < 10^{-4}$).

La valeur correspondant au minimum de dissemblance est variable suivant les plaques bosselées étudiées. Il est de 1,6 pour B9a6-i1, de 1,9 pour B4a6-i1 et de 1,5 pour B4a6-i2, montrant que pour ces sons, il existe un son de plaque homogène jugé semblable au son de plaque bosselée. Nous pouvons retenir que le minimum de dissemblance vaut 2,6 pour le son B1a6-i1 et 3,3 pour le son B4a7-i1 bien que pour ces deux sons le minimum ne soit pas clairement marqué.

Ces résultats posent les interrogations suivantes :

1. Pourquoi peut-on associer un son semblable aux sons B9a6-i1, B1a6-i1, B4a6-i2 et pourquoi pas aux sons B4a7-i1 et B1a6-i1 ? De quoi dépend le degré de dissemblance minimum ? Quels sont les critères de dissemblance perceptif et physique ? Ceci revient à expliquer la valeur du minimum de dissemblance suivant l'axe des ordonnées.
2. De quoi dépend la valeur de l'épaisseur équivalente ? Quels sont les critères d'équivalence perceptif et physique ? Ceci revient à expliquer la valeur du minimum de dissemblance suivant l'axe des abscisses.

4.2.5 Condition d'existence d'une épaisseur équivalente. Critère de dissemblance : timbre

Dans ce paragraphe, nous répondons à la première série de questions : de quoi dépend le degré de dissemblance minimum et quels sont les critères de dissemblance perceptif et physique ?

Pour répondre à ces interrogations, nous avons quantifié l'effet de la variation non homogène de l'épaisseur sur le spectre. L'effet de la modification de ce paramètre a été développé au paragraphe 2.2.1 du chapitre 2. Nous avons montré qu'une modification de l'épaisseur entraînait essentiellement une modification des composantes spectrales.

Les composantes spectrales sont les fréquences de résonance des plaques qui sont équivalentes aux fréquences propres de la plaque.

Pour quantifier cet effet, nous avons comparé les 70 premières fréquences propres d'une plaque bosselée aux 70 premières de la plaque d'épaisseur constante dont le son a été jugé le plus semblable à celle de la plaque bosselée. Cette différence entre la $k^{ième}$ fréquence propre de plaque bosselée et la $k^{ième}$ fréquence propre de la plaque d'épaisseur constante est quantifiée par le rapport $\frac{\Delta f}{f}$ qui est décrit par la relation 4.3 :

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_k = \frac{(f_B)_k - (f_H)_k}{(f_H)_k} \quad k = 1 \dots 70, \quad (4.3)$$

où les $(f_H)_k$ sont les fréquences propres successives de la plaque homogène et les $(f_B)_k$ sont celles de la plaque bosselée.

Une valeur du rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_k$ importante en valeur absolue signifie que l'écart fréquentiel entre le partiel numéro k du son de plaque bosselée et celui du son de plaque d'épaisseur constante est important. Inversement, une valeur du rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_k$ faible en valeur absolue signifie que les deux partiels k de chaque plaque sont presque superposés.

Les figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 présentent les variations du rapport $\frac{\Delta f}{f}$ entre une plaque bosselée et la plaque d'épaisseur constante correspondant au minimum de dissemblance en fonction du numéro de mode, pour les plaques rayonnant les sons B9a6-i1, B4a6-i1, B1a6-i1 et B4a6-i1 respectivement.

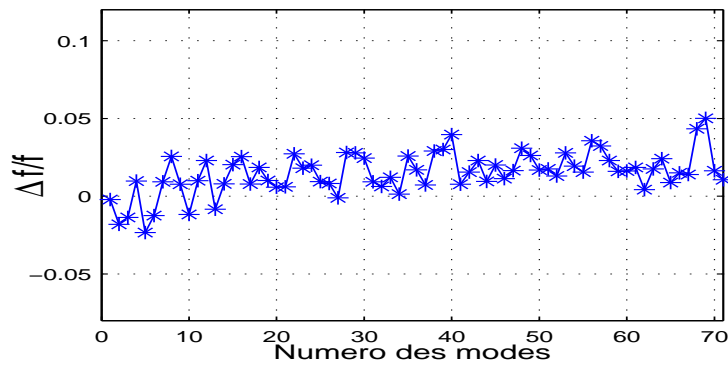


FIG. 4.9 – Variations du rapport $\frac{\Delta f}{f}$ entre la plaque rayonnant le son B9a6-i1 et celle rayonnant le son C524-i1 en fonction du numéro des modes

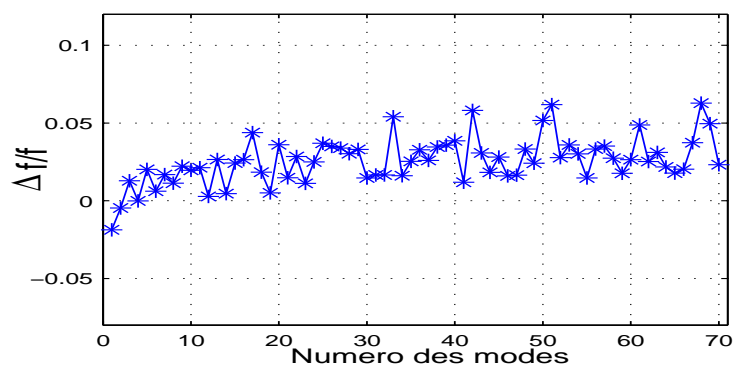


FIG. 4.10 – Variations du rapport $\frac{\Delta f}{f}$ entre la plaque rayonnant le son B4a6-i1 (ou B4a6-i2) et celle rayonnant le son C520-i1 en fonction du numéro des modes

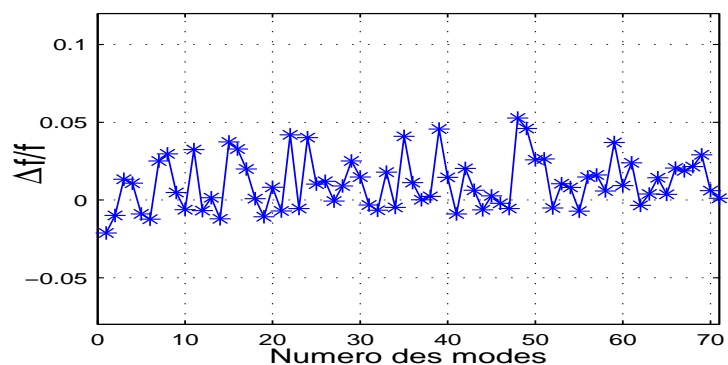


FIG. 4.11 – Variations du rapport $\frac{\Delta f}{f}$ entre la plaque rayonnant le son B1a6-i1 et celle rayonnant le son C530-i1 en fonction du numéro des modes

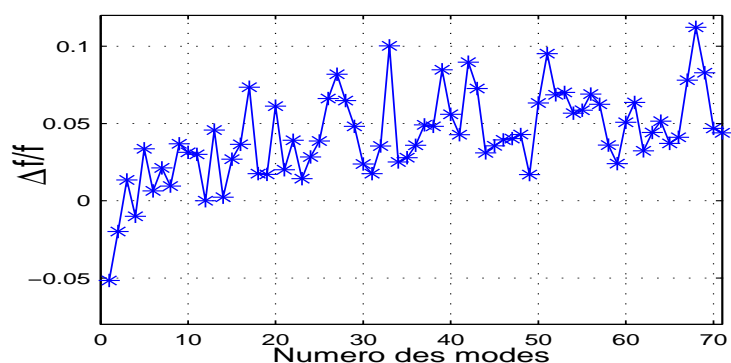


FIG. 4.12 – Variations du rapport $\frac{\Delta f}{f}$ entre la plaque rayonnant le son B4a7-i1 et celle rayonnant le son C548-i1 en fonction du numéro des modes

Les courbes présentent une succession de pics. En passant de la courbe 4.9 à la courbe 4.12, le nombre de pics et leurs amplitudes augmentent. Nous avons vu sur

la figure 4.4 que le minimum de dissemblance était de 1,6 pour le son B9a6-i1, qu'il était de 1,9 à la figure 4.6 pour le son B4a6-i1, de 2,6 à la figure 4.5 pour le son B1a6-i1 et de 3,4 à la figure 4.8 pour le son B4a7-i1. Le nombre de pics semble inversement proportionnel au minimum de dissemblance. Plus les pics sont nombreux et d'amplitude importante, plus la valeur du minimum de dissemblance augmente. Pour mieux comprendre l'effet de ces "pics", considérons par exemple deux cas de figure extrêmes sur quatre paires de fréquences propres c'est-à-dire sur quatre paires de composantes spectrales.

- Cas 1 : les écarts entre les $k^{ième}$ partiels du son de plaque bosselée et les $k^{ième}$ du son de plaque homogène sont tels que les rapports successifs $\frac{\Delta f}{f}$ sont constants. Le schéma de gauche à la figure 4.13 illustre cet exemple. Dans ce cas, les enveloppes spectrales des deux sons sont similaires. Les timbres des sons sont alors similaires.
- Cas 2 : les écarts entre les $k^{ième}$ partiels du son de plaque bosselée et les $k^{ième}$ du son de plaque homogène ne sont tels que les rapports successifs $\frac{\Delta f}{f}$ ne sont pas constants. Le schéma de droite à la figure 4.13 illustre cet exemple. Dans ce cas, les enveloppes spectrales sont d'autant plus différentes que les écarts entre les paires de fréquences sont plus importants. Les timbres des sons diffèrent.

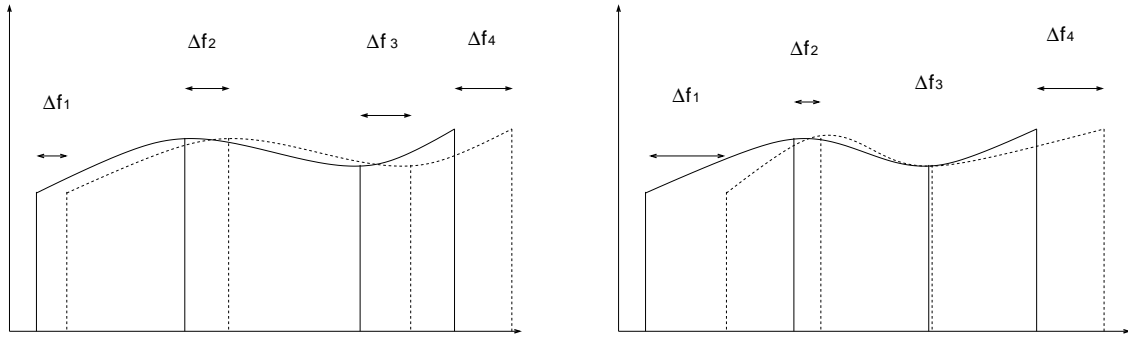


FIG. 4.13 – Schémas présentant deux cas de comparaison de l'enveloppe spectrale d'un son de plaque d'épaisseur constante (en trait plein) et celle d'un son de plaque bosselée (en tirets). Cas 1, à gauche : les Δf_i ($i=1..4$) sont tels que les rapports $\frac{\Delta f_i}{f_i}$ successifs sont constants. Cas 2, à droite : les Δf_i ($i=1..4$) sont tels que les rapports $\frac{\Delta f_i}{f_i}$ successifs ne sont pas constants.

Dans le premier cas, $\frac{\Delta f}{f}$ est constant quand le numéro de mode varie. Ainsi, les différences des rapports successifs $(\frac{\Delta f}{f})_k - (\frac{\Delta f}{f})_{k-1}$ sont nulles. Dans ce cas, la structure formantique de l'enveloppe spectrale du son de plaque homogène varie peu par rapport à celle de l'enveloppe spectrale du son de plaque bosselée.

Dans le second cas, $\frac{\Delta f}{f}$ varie suivant le numéro de mode. Les différences entre les rapports successifs sont importantes. Dans ce cas, la structure formantique est modifiée. Dans le premier cas les timbres des sons sont semblables alors que dans le second les timbres sont dissemblables car la structure formantique est modifiée [59]. Pour interpréter les effets des pics des variations du rapport $\frac{\Delta f}{f}$, nous considérons la moyenne de la somme des écarts en valeur absolue $(\frac{\Delta f}{f})_{moyen}$ qui représente la distance moyenne entre deux étoiles sur les figures 4.9 à 4.12. Ce rapport $(\frac{\Delta f}{f})_{moyen}$ est défini par la

relation suivante :

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{moyen} = \frac{1}{69} \sum_{k=1}^{70} \left| \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_k - \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{k-1} \right| \quad (4.4)$$

La figure 4.14 présente la corrélation entre le degré minimum de dissemblance et la valeur du rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{moyen}$ calculé pour les couples de sons les plus similaires.

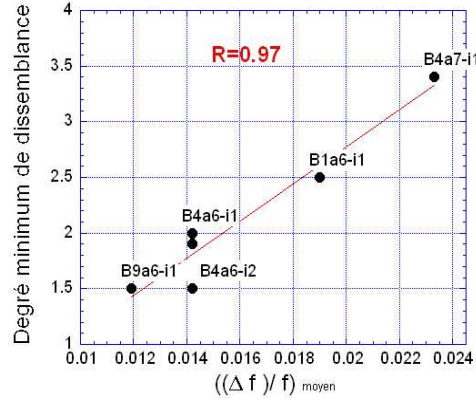


FIG. 4.14 – Degré de similarité en fonction du rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{moyen}$

Plus le rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{moyen}$ est élevé, plus la différence de timbre est importante. Le rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{moyen}$ correspondant au son B9a6-i1 est le plus faible ($1,2 \cdot 10^{-2}$) ce qui signifie que la différence entre deux $\frac{\Delta f}{f}$ consécutifs est faible en moyenne. Par conséquent, la différence de timbre entre les deux sons est faible. C'est pourquoi, il existe un son de plaque homogène similaire au son B9a6-i1.

Le rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{moyen}$ correspondant au son B1a6-i1 est plus élevé ($1,9 \cdot 10^{-2}$). Le décalage des fréquences propres de la plaque bosselée par rapport à celle d'épaisseur 5,30 mm est plus important en valeur absolue. C'est pourquoi il existe seulement un son de plaque homogène moyennement similaire au son B1a6-i1.

En revanche, le rapport $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{moyen}$ du son B4a7-i1 est le double de celui du son B9a6-i1 : ($2,3 \cdot 10^{-2}$). Le décalage des fréquences propres est important. La différence de timbre devient significative ce qui explique que le son B4a7-i1 n'a pas de son de plaque homogène similaire.

4.2.6 Détermination de la valeur d'épaisseur équivalente. Critère d'équivalence : la hauteur tonale

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré qu'un son de plaque d'épaisseur constante peut être similaire à un son de plaque d'épaisseur variable si les timbres des deux sons sont proches c'est-à-dire si les enveloppes spectrales sont similaires.

Dans ce paragraphe, nous répondons à la seconde série de questions du paragraphe 4.2.4 :

de quoi dépend la valeur de l'épaisseur équivalente et quels sont les critères d'équivalence perceptif et physique ?

Ici, notre analyse sera restreinte aux sons B9a6-i1, B4a6-i1, B4a6-i2 pour lesquels un son de plaque homogène a été jugé similaire. Une écoute informelle des sons a été effectuée par plusieurs membres de l'équipe. Lors de cette écoute nous avons cherché à identifier le paramètre perceptif de similarité entre le son de comparaison le plus semblable au son de référence d'épaisseur variable et le son de référence. Lorsque l'on écoute le son de B9a6-i1 et les sons du groupe 1, il semble que le son C524-i1 ait la hauteur tonale la plus proche de celle du son B9a6-i1. Cette constatation est également valable pour les sons B4a6-i1 et B4a6-i2. Pour trouver le paramètre physique associé à la hauteur tonale, regardons en détails les valeurs des fréquences propres de la plaque.

4.2.6.1 Influence du premier partiel

Dans notre cas, l'influence du premier partiel sur la hauteur tonale (qui pourrait être assimilé à une hauteur "fondamentale") est mis en évidence pour le son B9a6-i1.

A la figure 4.4, pour le son B9a6-i1, nous observons un minimum de dissemblance égal à 1 et placé au point d'abscisse 5,24 mm. Ce minimum correspond à une concordance des fréquences du premier partiel du spectre. La figure 4.15 présente les dissemblances estimées par les sujets en fonction de la première fréquence propre de chaque plaque homogène. Nous observons effectivement un minimum de dissemblance au point d'abscisse 288,4 Hz, fréquence la plus basse du spectre du son C524-i1 ; la fréquence la plus basse du spectre de B9a6-i1 étant de 287,8 Hz. Le critère de similarité pour l'étude du son B9a6-i1 est donc la hauteur du premier partiel.

Il n'y a pas de concordance du premier partiel entre le son B4a6-i1 et le son C520-i1 ni entre le son B4a6-i2 et le son C520-i2. Cependant, la concordance du premier partiel est effective entre le son B4a6-i1 et le son C510-i1 ainsi qu'entre le son B4a6-i2 et C510-i2. Sur les figures 4.6 et 4.7, nous remarquons un minimum "local" de dissemblance qui pourrait s'expliquer par la concordance de hauteur du premier partiel des deux paires de sons ; le critère de similarité a pu être la hauteur du premier partiel pour certains sujets.

4.2.7 Conclusion

Un son de plaque d'épaisseur constante peut être similaire à un son de plaque d'épaisseur variable si les timbres des deux sons sont proches c'est-à-dire si les enveloppes spectrales sont proches. La valeur du minimum de dissemblance dépend alors de la proximité des enveloppes spectrales.

Le critère perceptif de similarité entre un son de plaque bosselé et le son de plaque homogène le plus proche est la hauteur tonale. D'un point de vue physique, cela correspond à la concordance du premier partiel pour l'étude du son B9a6-i1. Pour l'étude des sons B4a6-i1 et B4a6-i2, afin de déterminer le critère physique menant à la similarité de hauteur tonale entre les sons de plaque d'épaisseur variable et les sons de plaque d'épaisseur constante équivalente, nous avons effectué une expérience d'appariement de hauteur tonale.

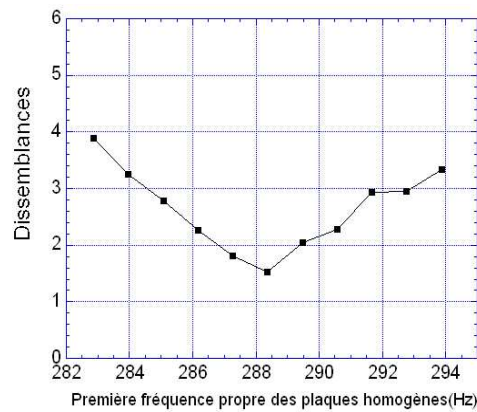


FIG. 4.15 – Dissemblances entre le son B9a6-i1 et les sons du groupe 1 en fonction des valeurs de la première fréquence propre des plaques d'épaisseur constantes

4.3 Appariement de hauteur tonale des sons de plaques

La hauteur tonale de signaux complexes, inharmoniques et transitoires est mal définie notamment pour des signaux de plaques tels que ceux que nous étudions. Dans le paragraphe précédent, l'influence du premier partiel sur la hauteur tonale a été mise en évidence. L'expérience d'appariement de hauteur tonale a été entreprise afin de connaître quel autre paramètre physique est responsable de la hauteur tonale des sons de plaque que nous étudions.

Pour évaluer la hauteur tonale des sons, nous avons utilisé la méthode d'ajustement par un son complexe harmonique, inspirée de celle de Houix [18], Schouten et Coll. [60] et de Moore et Moore [61].

4.3.1 Sujets

Dix-sept sujets ont effectué l'expérience dont 4 femmes et 13 hommes. La hauteur tonale est une grandeur perceptive connue essentiellement de spécialistes en musique. C'est pourquoi, seuls des musiciens ont effectué cette expérience d'appariement. Tous, étudiants ou membres du laboratoire, étaient bénévoles.

4.3.2 Sons

Nous avons choisi de tester un échantillon de 6 sons de plaque : les sons de plaque bosselés B4a6-i1, B9a6-i1, B1a6-i1 et les sons de plaque d'épaisseur constante équivalente C520-i1, C524-i1 et C530-i1. Les spectres des sons de plaque bosselée sont présentés à la figure 4.16. Ceux des sons de plaque d'épaisseur constante 5,2 et 5,3 mm sont présentés à la figure 4.17. Ces sons seront appelés, sons tests.

Pour l'ensemble des sons, parmi les composantes inférieures à 1000 Hz, les première, seconde et quatrième sont celles qui ont le plus d'énergie.

Ces sons étaient générés par une chaîne Tucker-Davis en utilisant un convertisseur analogique-numérique.

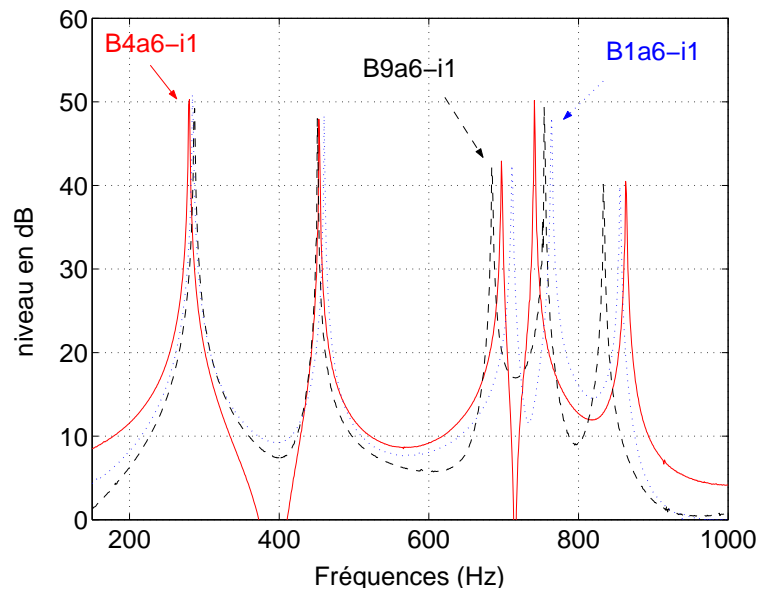


FIG. 4.16 – Spectres des sons de plaques bosselées calculés sur la première seconde de signal : son B4a6-i1 (en trait plein), son B9a6-i1 (en tirets) et son B1a6-i1 (en pointillés)

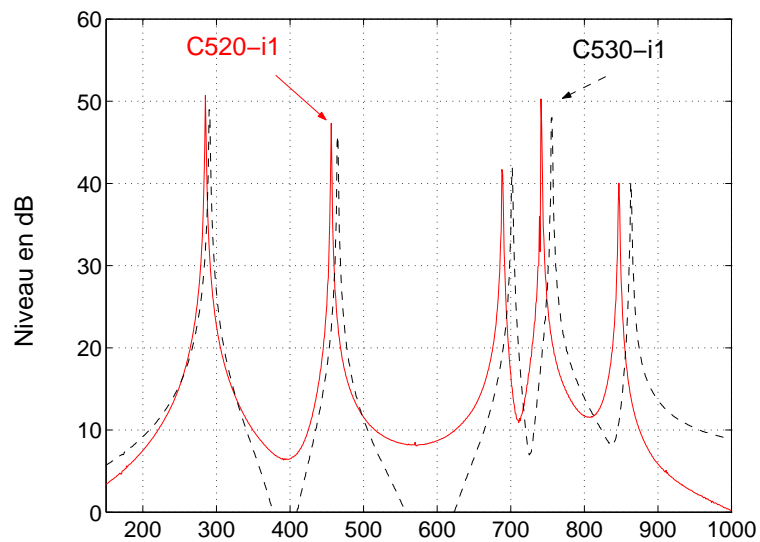


FIG. 4.17 – Spectre des deux sons de plaque d'épaisseur constante C520-i1 (en trait plein) et C530-i1 (en tirets) calculés sur 1 seconde.

Des sons complexes harmoniques ont été utilisés pour l'ajustement de la hauteur tonale des sons de plaques. Ces sons étaient amortis exponentiellement de telle sorte à ce que le timbre de ces sons et celui des sons de plaques soient les plus semblables possible. La durée du son complexe harmonique était de 250 ms. La fréquence maximale d'une harmonique était de 8000 Hz car les sons de plaques étaient définis jusqu'à 8000 Hz. Le nombre d'harmoniques était limité à 70, ce qui correspond globalement au nombre de composantes présentes dans le signal de plaque. Les différentes harmoniques avaient les mêmes amplitudes. Le son complexe harmonique était généré par un programme écrit en Max-MSP sur un portable Macintosh. On appellera ce son, le son de comparaison.

L'écoute des sons était faite en dichotique avec le casque STAX : le son de plaque était présenté à l'oreille droite et le son complexe à l'oreille gauche.

4.3.3 Procédure

Les deux sons étaient présentés en boucle avec un intervalle de silence de 250 ms. Le son de plaque était présenté en continu à l'oreille droite et le son complexe était aussi présenté en continu à l'oreille gauche. Les sujets avaient la possibilité d'interrompre l'écoute d'un des deux sons à tout moment. Les sujets devaient ajuster la fréquence fondamentale du son harmonique de telle sorte à ce que la hauteur du son complexe soit la plus proche possible de celle du son de plaque. Pour effectuer cette tâche, les sujets disposaient d'un curseur qu'ils pouvaient déplacer sur l'écran de l'ordinateur portable à l'aide d'une souris de façon à modifier la fréquence fondamentale du son complexe.

4.3.4 Conversion des résultats

Pour l'analyse des résultats, l'échelle musicale (dimension chroma selon laquelle deux sons purs ont la même hauteur tonale lorsque leurs fréquences sont en rapport 2) va être prise en compte. Pour associer les fréquences appariées à des notes de musiques, nous avons procédé de la manière suivante :

- Les composantes spectrales des sons ont été recensées jusqu'à 2000 Hz.
- Un intervalle de fréquence autour de chaque composante a été déterminé. Les bornes supérieures et inférieures de cet intervalle correspondent respectivement à la valeur de la composante plus ou moins un quart de ton.
- La note de musique appartenant à chaque intervalle de fréquence est identifiée.
- Si la fréquence appariée du son de comparaison appartient à un intervalle de fréquence alors elle sera associée à la note correspondante.

Par exemple, à la figure 4.18, la huitième composante spectrale du son B4a6-i1 est à 1315 Hz. Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de fréquence associées à cette composante sont respectivement $(1315 \div 2^{1/24})$ et $(1315 \times 2^{1/24})$. L'intervalle est donc [1277 ; 1353 Hz]. La note associée à cet intervalle est le Mi 5 dont la fréquence est de 1318,5 Hz.

Le tableau 4.2 regroupe les composantes spectrales du son B4a6-i1, les intervalles de fréquence et les notes associées. Nous remarquons sur ce tableau que la composante

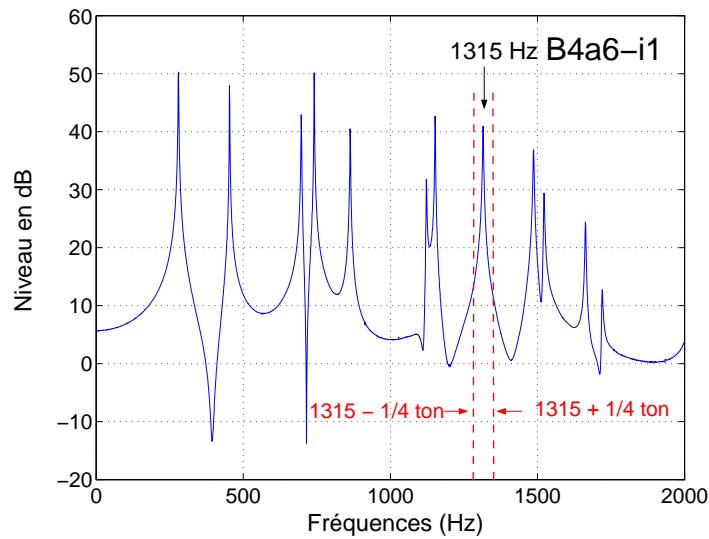


FIG. 4.18 – Spectre du son B4a6-i1 calculé sur 1 s. Les traits verticaux en tirets représentent les bornes inférieures et supérieures des intervalles de fréquences déterminés pour chaque composante spectrale

spectrale à 1486,8 Hz est une harmonique de la composante à 741,4 Hz, ce qui peut renforcer la hauteur tonale produite par la note associée à savoir le Fa#.

Composante spectrale (Hz)	Intervalle de fréquence	Note
279,7	[271, 7; 287, 9]	Do # 3
453,8	[440, 1, 5; 467, 1]	La # 3
697,4	[677, 5; 717, 8]	Fa 4
741,4	[733, 6; 748, 6]	Fa # 4
864	[839, 4; 889, 4]	La 4
1122	[1090; 1154, 9]	Do#
1153	[1120, 2; 1186, 8]	Ré 5
1315	[1277, 6; 1353, 5]	Mi 5
1486,8	[1444, 5; 1530, 4]	Fa # 5

TAB. 4.2 – Notes correspondant aux composantes spectrales du signal B4a6-i1 respectives jusqu'à 2000 Hz +/- 1/4 de ton

Pour chaque son test si la fréquence fondamentale du son de comparaison appariée se trouve à l'intérieur d'un intervalle de fréquence alors la fréquence du son de comparaison est associée à la note correspondante. Si la fréquence appariée est un multiple (ou un rapport) de 2 d'une composante spectrale du son test alors la fréquence appariée est associée à la note correspondante de cette composante spectrale. Ceci signifie que les sujets se sont trompés d'une octave.

Pour chaque son testé, de même que pour le son B4a6-i1, une note a été associée à chaque composante spectrale. L'ensemble des notes sont regroupées dans le tableau 4.3.

Numéro de la composante	C520-i1	C524-i1	C530-i1	B4a6-i1	B9a6-i1	B1a6-i1
1	285 (Do#)	287 (Ré)	291 (Ré)	280 (Do#)	287 (Ré)	284 (Do#)
2	456 (La#)	459 (La#)	465 (La#)	453 (La)	451 (La)	460 (La#)
3	688 (Fa)	694 (Fa)	702 (Fa)	697 (Fa)	684 (Fa)	711 (Fa)
4	741 (Fa#)	747 (Fa#)	756 (Fa#)	741 (Fa#)	754 (Fa#)	764 (Sol)
5	847 (Sol#)	853 (Sol#)	863 (La)	863 (La)	833 (Sol#)	855 (La)
6	1116 (Do#)	1125 (Do#)	1138 (Do#)	1122 (Do#)	1111 (Do#)	1123 (Do#)
7	1134 (Do#)	1143 (Ré)	1156 (Ré)	1152 (Ré)	1153 (Ré)	1185 (Ré)
8	1301 (Mi)	1311 (Mi)	1326 (Mi)	1315 (Mi)	1344 (Mi)	1365 (Fa)
9	1454 (Fa#)	1466 (Fa#)	1483 (Fa#)	1487 (Fa#)	1477 (Fa#)	1490 (Fa#)
10	1495 (Fa#)	1507 (Fa#)	1524 (Fa#)	1522 (Fa#)	1489 (Fa#)	1515 (Fa#)
11	1630 (Sol#)	1642 (Sol#)	1661 (Sol#)	1663 (Sol#)	1658 (Sol#)	1715 (Sol#)
12	1715 (Sol#)	1729 (La)	1748 (La)	1720 (La)	1768 (La)	1736 (La)

TAB. 4.3 – Notes associées aux différentes composantes spectrales (Hz) des sons de plaque testés

4.3.5 Résultats

Pour chaque son test, les résultats sont regroupés sous forme d'un histogramme. Chaque histogramme présente les effectifs dénombrés pour chaque note du son de comparaison que l'on a pu associée à une composante spectrale du son test. Dans la partie "autres", sont regroupés les fréquences qui ne correspondent à aucune note associée à une composante spectrale du son test. La figure 4.19 regroupe les 6 histogrammes résultant des 6 sons testés.

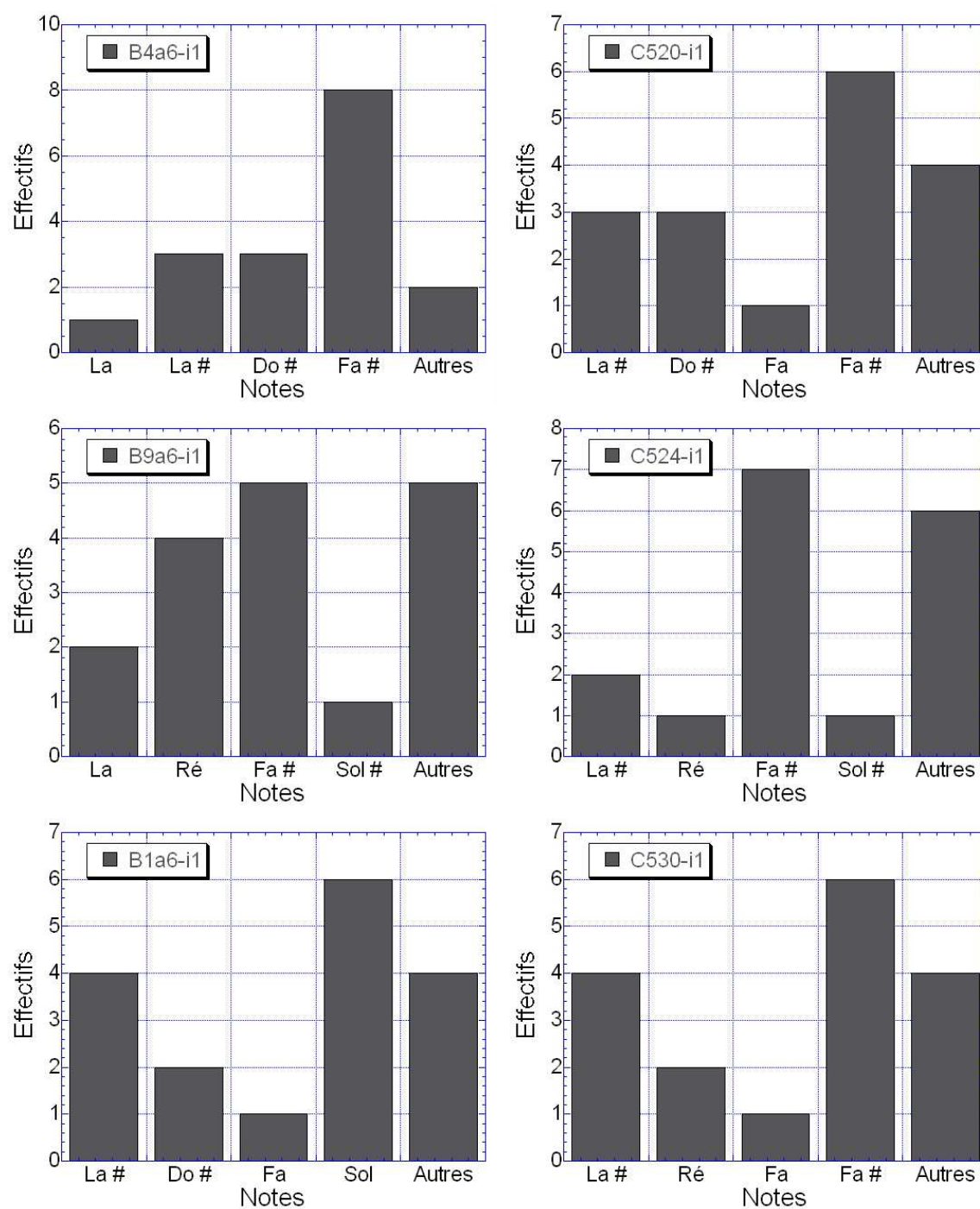


FIG. 4.19 – Résultats de l'expérience d'ajustement. Histogrammes représentant l'effectif des jugements selon l'échelle musicale, pour les 6 sons de plaques.

Tout d'abord, les effectifs dans la catégorie "autres" sont non négligeables notamment pour les sons B9a6-i1, B1a6-i1, C520-i1, C524-i1 et C530-i1. Deux causes pourraient expliquer cet effet : soit les tests étaient difficiles si bien que les sujets avaient des difficultés à ajuster la hauteur d'un son complexe sur celle d'un son de plaque. Soit les auditeurs ont apparié la hauteur du son complexe sur des fréquences qui ne correspondent pas à des composantes spectrales. Certains d'entre eux se sont peut-être basés sur une hauteur qui n'est pas associée à une composante spectrale mais aucun groupe de sujet ne s'est distingué par rapport à ce choix.

La seconde constatation concerne la dispersion des réponses qui est importante pour l'ensemble des sons ajustés. Il n'y a pas qu'une seule note appariée par son. Certains sujets ont été plus sensibles à la tonalité d'une fréquence plutôt qu'à celle d'une autre. A présent, faisons une analyse plus détaillée des résultats :

- **Pour le son B4a6-i1**, le Fa# émerge parmi les jugements puisque 47% des sujets ont ajusté la hauteur du son de plaque sur celle de cette note qui correspond, à une composante du signal (à 741 Hz) ayant beaucoup d'énergie (voir figure 4.16). Ensuite, ce son de plaque a été ajusté sur le Do# et le La# qui correspondent respectivement à la première composante à 279,7 Hz et à la seconde à 453,8 Hz. Ces composantes ont également beaucoup d'énergie.
- **Pour le son C520-i1**, la forme des résultats est similaire à celle du son B4a6. En effet, une forte proportion des sujets (35%) a ajusté la hauteur du son de plaque sur celle du Fa#, 18% des sujets sur celle du La# et 18% sur celle du Do#. Ces trois notes correspondent également aux composantes spectrales qui ont le plus d'énergie dans le spectre (voir figure 4.17).
- **Pour le son B9a6-i1**, 30% des sujets ont basé leurs jugements sur le Fa# et 23% sur le Ré. Ces deux notes correspondent respectivement à la première et à la quatrième composante qui ont le plus d'énergie aussi.
- **Pour le son C524-i1**, une note émerge principalement des jugements : le Fa# pour 40% des sujets. Cette note correspond à la quatrième composante spectrale qui a beaucoup d'énergie dans le spectre.
- **Pour le son B1a6-i1**, le Sol domine les autres notes avec 35% des jugements des effectifs. Ensuite, il y a le La# avec 23% des jugements. Ici encore ces notes correspondent respectivement aux quatrième et seconde composantes spectrales.
- **Pour le son C530-i1**, 35% des jugements étaient associés au Fa# et 23% au La#. Elles correspondent aux quatrième et seconde composantes spectrales qui ont également beaucoup d'énergie

Globalement, les sujets ont apparié la hauteur tonale du son de plaque sur celle de sons complexes dont la fréquence fondamentale était une composante des signaux. Cette composante, la quatrième et correspondant à un Fa# (ou au Sol pour le son B1a6-i1), avait la particularité pour chacun des signaux d'avoir une forte énergie (voire le plus d'énergie). Ensuite, les jugements se sont portés sur deux autres composantes particulières des signaux, les première et seconde composantes du signal et correspondant respectivement à un Do# (ou un Ré suivant les sons) et au La# (ou au La suivant les sons). D'autres sujets ont apparié la hauteur tonale du son de plaque sur d'autres composantes des signaux qui avaient peu d'énergie. Dans d'autres cas, les sujets ont apparié la hauteur des sons sur des fréquences pour lesquelles le son n'a pas de composantes. Le critère de jugement de ces sujets reste indéterminé.

4.3.6 Discussion

Deux autres expériences basées sur deux méthodes différentes ont été menées pour l'appariement de hauteur tonale.

Pour la première expérience, une méthode adaptative avait été utilisée afin d'apparier la hauteur tonale d'un son pur sur celle d'un son de plaque. Cette expérience est brièvement présentée en Annexe E. Seulement deux sons de plaque ont été testés : B4a6-i1 et C520-i1. Cette méthode présentait deux inconvénients :

- le résultat dépendait de la fréquence de départ du son pur ; en effet, la majorité des auditeurs appariaient la hauteur du son pur sur la hauteur de la composante spectrale du son de plaque la plus proche en fréquence de départ fixée par les expérimentateurs ;
- La durée d'un test était assez longue, de l'ordre de 20 minutes par son de plaque.

Pour la seconde expérience, informelle, nous avons utilisé un piano. Les auditeurs écoutaient un son de plaque et avaient pour consigne de désigner, en s'aidant du piano, quelle était la note de musique dont la hauteur était la plus proche du son de plaque. L'avantage de cette expérience était que les sujets pouvaient désigner plusieurs notes s'ils entendaient plusieurs hauteurs. Cependant, cette expérience manquait de rigueur. Seulement le son B4a6-i1 a été testé.

Les résultats des trois expériences (ajustement par un son complexe, appariement par un son pur et piano) sont regroupées dans le tableau 4.4. Pour chaque méthode, pour chaque son testé, les résultats sont rassemblés sous forme de pourcentages par note associée à une composante spectrale.

Notes	Méth. adaptative		Piano	Méth. d'ajustement					
	B4a6-i1	C520-i1		C520-i1	C524-i1	C530-i1	B4a6-i1	B9a6-i1	B1a6-i1
La	1	2	8	×	×	×	6	12	×
La#	16	15	15	18	12	23	18	×	23
Do	×	×	8	×	×	×	×	×	×
Do#	14	15	31	18	×	×	18	×	×
Ré	8	×	15	×	6	12	×	23	12
Fa	1	×	×	6	×	16	×	×	6
Fa#	16	29	77	35	41	35	47	29	35
Sol	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Sol#	×	×	×	×	6	12	×	6	12
Autres	44	39	15	23	35	12	12	29	12

TAB. 4.4 – Récapitulatif des résultats pour chaque méthode, en pourcentage

Pour le son B4a6-i1, le pourcentage maximum est obtenu par les trois méthodes pour le Fa#. La hauteur de la 4^{ième} composante spectrale du son B4a6-i1 est donc dominante. Ensuite, les notes les plus appariées ont été le La# et le Do#. Les hauteurs des 2^{nde} et 1^{ième} composantes sont donc également audibles et influencent la hauteur tonale du son de plaque.

Pour le son C520-i1, les résultats sont similaires à ceux du son B4a6-i1, le pourcentage maximum est obtenu par la méthode adaptative et par la méthode d'ajustement pour le Fa#. La hauteur de la 4^{ième} composante spectrale est ici encore dominante. Ensuite, les notes les plus appariées ont été le La# et le Do#. Les hauteurs des 2^{nde} et 1^{ière} composantes ont également un effet.

Globalement, pour ces deux sons, une similarité des résultats est observée pour des différentes méthodes, ce qui conforte les résultats obtenus par la méthode d'ajustement.

Bien qu'une note émerge pour chaque son testé, une dispersion importante des résultats est cependant observée pour l'ensemble des sons et pour les trois méthodes. Il semble que dans l'ensemble une proportion importante des sujets aient entendu la hauteur d'une composante spectrale. Cette composante correspond à celle qui a le plus d'énergie. D'autres sujets ont été sensibles à la hauteur d'autres composantes spectrales qui ont également beaucoup d'énergie.

4.4 Synthèse des résultats

Le but de ces expériences d'appariement était de connaître le critère acoustique responsable de la hauteur tonale des sons de plaques. Les résultats montrent que la hauteur d'un son de plaque est celle des composantes spectrales qui ont le plus d'énergie. La hauteur d'une composante est d'autant plus saillante que cette composante a de l'énergie.

En comparant les résultats obtenus pour chaque paire de sons les plus semblables (de plaque d'épaisseur variable et d'épaisseur équivalente), nous pouvons en déduire les constatations qui suivent. Les sons B4a6-i1 et C520-i1 ont des hauteurs tonales très proches car la majorité des sujets a ajusté la hauteur de ces sons sur celle du Fa# qui correspond à la composante spectrale à 741 Hz. Ces deux sons sont donc très semblables car il y a une concordance de cette fréquence et donc une proximité de hauteur tonale.

Les hauteurs des sons B1a6-i1 et C530-i1 sont celles de la 4^{ième} composante spectrales et correspondent respectivement au Sol (764 Hz) et au Fa# (756 Hz). Finalement, ces deux sons ont été jugés moyennement semblables (voir figure 4.5) peut-être parce que la plaque d'épaisseur constante équivalente n'a pas été testée au cours des expériences de similarité.

La hauteur du son B9a6-i1 est partagée entre celle de la 1^{ière} et de la 4^{ième} composante spectrale alors que la hauteur du son C524-i1 est essentiellement celle de la 4^{ième} composante. Pourtant, pour les expériences de similarité, les sujets avaient basé leur jugement sur la hauteur du premier partiel. Le poids de cette composante a été mis en évidence dans les tests d'ajustement pour le son B9a6-i1. Il semble que la hauteur soit perçue différemment suivant les individus. Peut-être que les sujets ayant effectué

l'expérience de similarité étaient plus sensibles à la hauteur du premier partiel alors que ceux ayant effectué l'expérience d'appariement étaient plus sensibles à celle du 4^{ième} partiel. Une autre hypothèse serait que les tâches d'appariement et de similarité étaient différentes. Pendant l'expérience d'appariement, les sujets ont peut-être entendu deux hauteurs tonales mais ne devaient en choisir qu'une. Pour l'expérience de similarité, ils ont accordé leurs jugements sur une composante qui relatait au mieux la similarité entre le son de plaque d'épaisseur variable et le son équivalent d'épaisseur constante.

4.5 Conclusion et perspectives

Le but de cette étude était de savoir s'il existait un son de plaque d'épaisseur constante semblable perceptivement à un autre son de plaque d'épaisseur variable. Il s'agissait de trouver dans le cas favorable, quels étaient les critères perceptifs et physique d'équivalence qui permettaient de déterminer la valeur de l'épaisseur équivalente. Puis, il s'agissait de déterminer pourquoi dans certains cas, il n'y a pas de similarité entre les sons et donc pourquoi il n'existe pas d'épaisseur équivalente. Les schéma à la figure 4.20 reprend les différentes étapes qui permettent de répondre à ces questions.

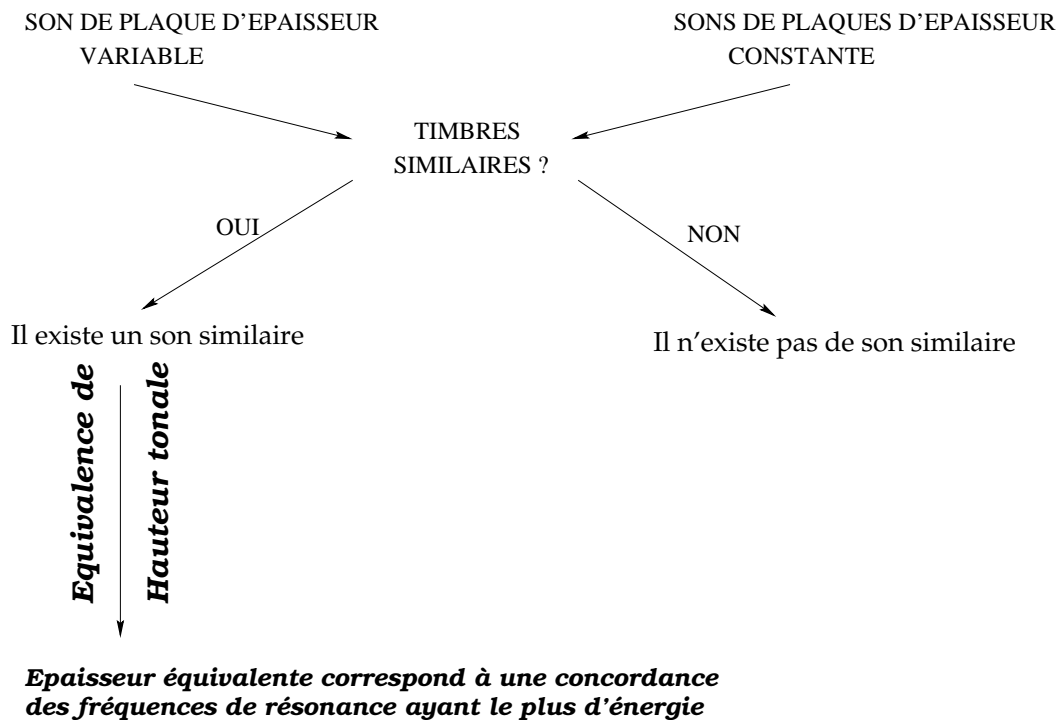


FIG. 4.20 – Détermination de l'épaisseur équivalente d'une plaque homogène dont le son est similaire à celui d'une plaque d'épaisseur variable

Nous avons défini et testé différentes géométries de plaques bosselées à partir desquelles les sons ont été synthétisés. Au cours de tests de dissemblances, un son de

plaque bosselé a été comparé à N sons de plaques homogènes. Les résultats ont montré que si le timbre du son de plaque bosselé est similaire au timbre des sons de plaques homogènes c'est-à-dire si les enveloppes spectrales sont proches alors il existe un son de plaque homogène similaire au son de plaque bosselé. Le critère d'équivalence entre le sons de plaque bosselé et celui de plaque d'épaisseur constante équivalente est la hauteur tonale. La valeur de l'épaisseur équivalente correspond à une concordance de la composante spectrale ayant le plus d'énergie.

Ces hypothèses ont été vérifiées pour les sons B9a6-i1, B4a6-i1 et B4a6-i2. En revanche, l'intervalle d'épaisseur choisi pour tester le son B1a6-i1 semble insuffisant. En effet, le son dont la hauteur tonale serait la plus proche de ce son de plaque bosselée n'a pas été calculé. Il serait intéressant de renouveler le test de similarité entre le son B1a6-i1 et des sons de plaque d'épaisseur constante avec un intervalle d'épaisseur incluant l'épaisseur équivalente hypothétique.

D'autres géométries de plaque pourraient être testées afin de reproduire les tests de dissemblances pour confirmer les hypothèses que nous avons émises.

Un logiciel de simplification de la modélisation d'épaisseur sur des critères perceptifs pourrait être conçu. Ce logiciel indiquerait s'il existe ou pas une plaque d'épaisseur constante équivalente. Si c'est le cas, il pourrait indiquer la valeur de l'épaisseur équivalente.

Enfin, à plus long terme, le problème de la hauteur tonale des sons de plaque pourrait être approfondi ce qui reviendrait à étudier les sons transitoires, complexes et inharmoniques. Les expériences d'appariement de hauteur tonale pourraient être renouvelées pour des signaux rayonnés par d'autres plaques ou excitées différemment (durée d'impact plus élevées menant à l'étude de sons dont le niveau des composantes est renforcé en basses fréquences).

Chapitre 5

Comparaison objective et perceptive de signaux enregistrés et synthétisés

5.1 Objectif : minimiser des différences perceptives

Les études présentées dans les chapitres précédents ont été effectuées avec des sons de synthèse élaborés à partir d'un modèle physique. La méthode de calcul des signaux a été présentée au chapitre 2. Le but poursuivi dans l'étude présentée ici est de déterminer une façon de minimiser les différences perceptives entre signaux enregistrés et synthétisés. Cette étude se décline en quatre étapes que l'on peut formuler en quelques questions :

- Quels sont les paramètres du modèle pertinents à prendre en compte précisément afin que les différences temporelles et/ou spectrales entre un son enregistré et le son de synthèse correspondant soient minimales ?
- Ces minimums de différences "physiques" correspondent-ils à des minimums de différences d'un point de vue perceptif ?
- Le son synthétisé le plus semblable d'un point de vue physique étant déterminé, demeure-t-il des différences perceptives entre les deux types de sons ?
- Si oui, à quoi correspondent-elles dans le modèle ?

Pour cette étude, nous traitons le cas particulier d'une plaque en acier, encastrée et excitée par un marteau à choc dont la tête est en caoutchouc. Le choix de l'excitation a été effectué à la suite d'expériences menées préalablement et présentées en début de chapitre. Ce type d'excitation produit des signaux dont l'énergie est essentiellement concentrée dans les basses fréquences (en dessous de 1 kHz). Ainsi, la validité de la méthode sera essentiellement testée sur les composantes basses fréquences.

La démarche adoptée au cours de cette étude est résumée par le schéma 5.1.

Nous avons effectué des mesures, en chambre sourde, de l'excitation, de l'accélération sur la plaque et du champ de pression rayonné dans l'espace. Puis, nous avons introduit dans le modèle les paramètres géométriques et mécaniques du système nécessaires à la synthèse des signaux. Ensuite, une comparaison objective a été faite entre les signaux enregistrés et les signaux synthétisés. Dans le cas où les signaux différaient, nous avons tenté de réduire ces dissemblances en recalant les paramètres d'entrée du modèle. En effet, des incertitudes (① sur le schéma), sur la géométrie ou sur l'encastrement par exemple, entrent en compte dans les mesures ; une façon de

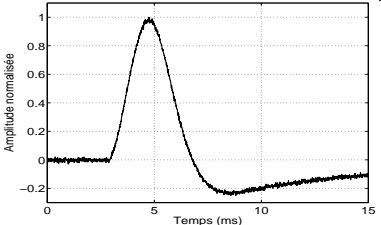
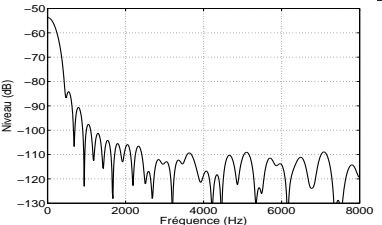
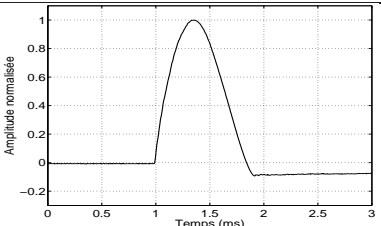
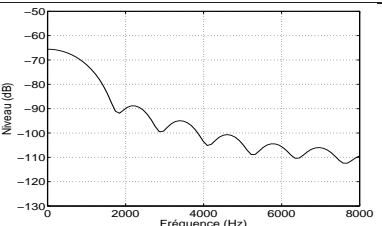
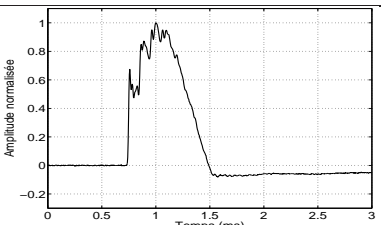
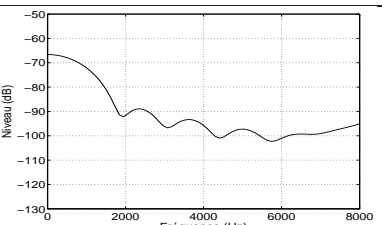


FIG. 5.1 – Démarche adoptée pour l'étude

les réduire est de modifier la valeur des paramètres d'entrée du problème. Lorsque les signaux étaient les plus semblables possible d'un point de vue objectif, ils ont été soumis à des tests psychoacoustiques. Le but de ces tests était de savoir si les minimums objectifs correspondent à des minimums perceptifs. Les résultats ont permis de définir le meilleur recalage des paramètres d'un point de vue perceptif. Enfin, les dissemblances ont été interprétées sur ce cas particulier de signaux.

5.2 Expérience préliminaire : choix du type d'excitation

Des expériences préliminaires ont été effectuées afin de déterminer le type d'excitation que nous allons utiliser pour notre étude. Nous avons enregistré des signaux (excitations et pression) de plaques frappées avec un marteau à choc dont la tête était soit en caoutchouc, soit en métal, soit en plastique. Les caractéristiques de chaque fonction d'excitation mesurée sont rassemblées dans le tableau 5.1.

Matériau des têtes	T (ms)	Forme temporelle de l'excitation	Spectre de l'excitation
Caoutchouc	3		
Plastique	0,8		
Métallique	0,7		

TAB. 5.1 – Caractéristiques des excitations pour les différentes têtes de maillet, T représente la durée d'impact

Nous pouvons constater que la forme temporelle de l'excitation correspondant à la tête en métal n'est pas régulière. Dans ce cas, l'excitation est donc difficile à modéliser. En revanche, la forme des excitations pour les têtes en caoutchouc et en plastique sont plus régulières. Par conséquent, elles peuvent être mieux définies. Les durées d'impact T varient de 0,7 ms (pour le métal) à 3 ms environ (pour le caoutchouc). Ces durées d'impact influencent directement le domaine spectral à étudier (voir chapitre 2). Le

choix de l'excitation avec la tête en plastique revient à étudier une largeur de bande de fréquences allant jusqu'à 4000 Hz environ alors que le domaine d'étude est plus restreint lorsqu'il s'agit du caoutchouc : il s'étend jusqu'à 1000 Hz environ. Finalement, l'utilisation de la tête en caoutchouc présente deux avantages : la limitation de l'étude à un domaine basses fréquences et la possibilité d'avoir moins d'incertitudes quant à la modélisation de l'excitation (la mesure étant plus "lisse" pour la tête en caoutchouc que pour celle en métal). L'expérience de la plaque excitée avec un maillet muni de la tête en caoutchouc a été reproduite afin d'obtenir des mesures plus nombreuses, pour plusieurs points d'impact, d'accélération et de pression.

5.3 Réalisation expérimentale

Pour cette étude, la plaque est en acier. Sa masse volumique ρ_p est égale à 7800 kg/m³, son coefficient de Poisson ν vaut 0,3 et la valeur de son module d'Young E_0 est de $2,05 \cdot 10^{11}$ Pa. La plaque est encastrée dans un mur parfaitement rigide (en béton) qui sépare deux salles anéchoïques et qui communiquent par une ouverture rectangulaire dont le périmètre est muni d'un encadrement perforé et en aluminium. La plaque, également perforée sur ses bords, s'encastre dans le mur grâce à des vis qui permettent de la fixer sur l'encadrement (voir la figure 5.2). Les conditions d'encastrement (déplacement nul) sont réalisées, à l'aide de barres en aluminium placées le long des quatre côtés. L'ensemble du système a été fixé à l'aide d'une clé dynamométrique avec un serrage à 3 N.m. Dans notre cas, mesurer les dimensions de la plaque revient à mesurer les différentes longueurs le long de l'encastrement. La longueur varie entre $L_{y1} = 89,2$ cm et $L_{y2} = 89,35$ cm. La largeur varie entre $L_{x1} = 75,4$ cm et $L_{x2} = 75,5$ cm. La plaque n'est pas tout à fait rectangulaire. Par la suite, on considérera une longueur moyenne de 89,275 cm, une largeur moyenne de 75,45 cm pour nos simulations. L'épaisseur de la plaque a été mesurée avec un pied à coulisse en 21 points équidistants situés sur les bords de la plaque. L'épaisseur n'est pas constante puisque sa valeur varie suivant les points de mesure. L'épaisseur moyenne résultante est de 1,995 mm.



FIG. 5.2 – Photo de l'expérience

La plaque a été excitée par un marteau à choc dont la tête était munie d'un capteur qui permettait de mesurer l'accélération au cours du choc. La plaque a été excitée en 7 points distincts dont les coordonnées se trouvent dans le tableau 5.2. Les points d'impacts sont présentés à la figure 5.3. En particulier, le point 5 est au centre de la plaque et le point 6 est le symétrique du point 1 par rapport à l'axe des x .

Numéros des impacts	x (cm)	y (cm)
1	16,9	-16,9
2	1,5	-2,8
3	27,3	-33,7
4	-32	-37,7
5	0	-0,2
6	16,8	16,9
7	-0,3	30,1

TAB. 5.2 – Coordonnées des points d'impact

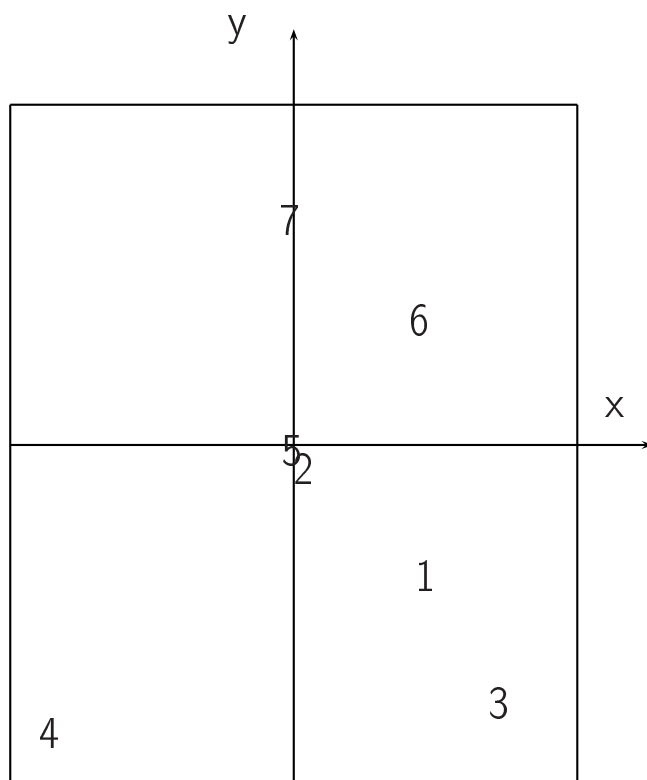


FIG. 5.3 – Localisation des points d'impact sur la plaque

Trois mesures vibroacoustiques et trois enregistrements sonores ont été effectués simultanément. Ces six enregistrements simultanés ont été reproduits trois fois pour chaque point d'impact. Les trois mesures vibroacoustiques, faites à l'aide d'un analyseur Paragon, avaient pour but d'identifier la fonction d'excitation produite par un marteau à choc M, de mesurer l'accélération sur la plaque et le champ de pression. Un accéléromètre mesurait l'accélération en un point A de la plaque et un microphone B&K omnidirectionnel mesurait la pression rayonnée par la plaque en un point V de l'espace. Ils étaient tous deux reliés à un amplificateur NEXUS. Les signaux ont été enregistrés sur une durée de 500 ms avec une fréquence d'échantillonnage égale à 8192 Hz.

Trois prises de sons avec deux microphones cardioïdes (Capsules AKG Blue Line CK-

91 et corps de microphones AKG Blue Line SE-300 B) et un autre omnidirectionnel (Capsule AKG Blue Line CK-92 et corps de microphones AKG Blue Line SE-300 B) ont été faites en trois points respectifs C1, C2 et O de l'espace. La saisie des données s'effectuait à l'aide d'un PC (Carte son RME DIGI9652) et du logiciel Cool Edit Pro. La fréquence d'échantillonnage était de 44100 Hz. Le but était de soumettre ces sons à des tests psychoacoustiques.

Un schéma de l'expérience est présenté à la figure 5.4 et les coordonnées des points de mesure sont présentées dans le tableau 5.3.

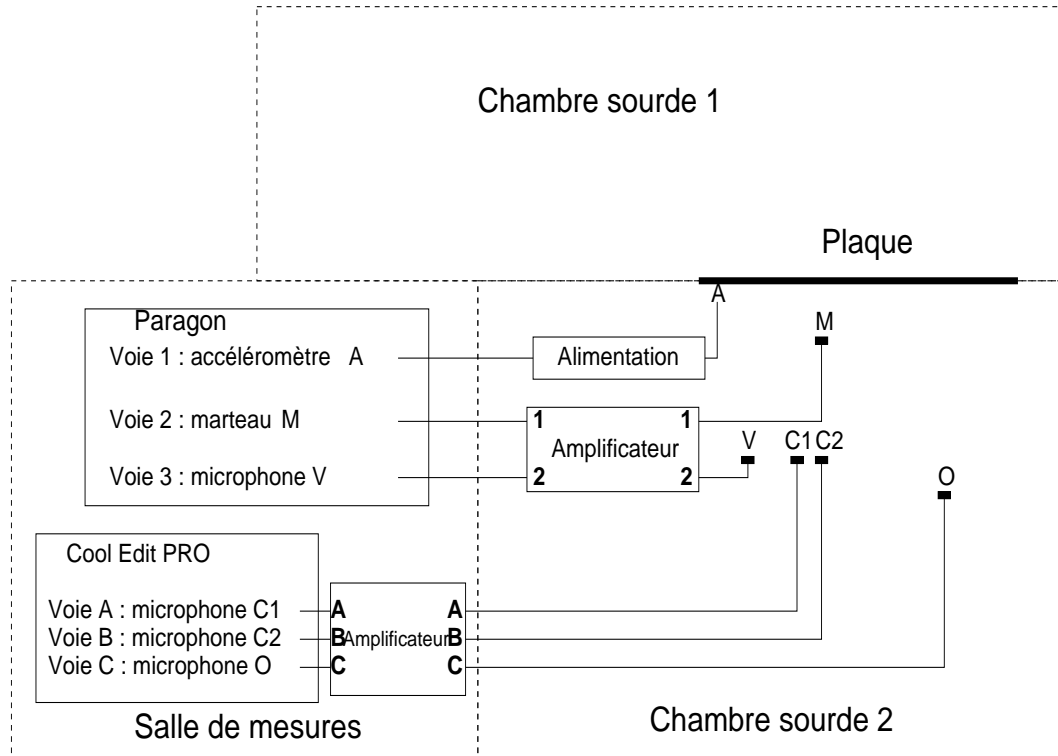


FIG. 5.4 – Schéma de l'expérience

Instruments de mesure	Points respectifs	x (cm)	y (cm)	z (cm)
Accéléromètre	A	23,6	-37,1	0
Microphone B&K omnidirectionnel	V	1,3	-28,1	89,5
Microphone Cardioïde 1	C1	-15,7	-4,8	89
Microphone Cardioïde 2	C2	5,3	-3,8	89
Microphone Omnidirectionnel	O	-20,2	30,6	125

TAB. 5.3 – Coordonnées des points de mesure. L'origine (0,0) est située au centre de la plaque

Lors de l'expérience, des incertitudes sont à prendre en compte, notamment en ce qui concerne la géométrie de la plaque. La dispersion des mesures était de l'ordre

de 0,01 mm pour l'épaisseur, ce qui engendre une erreur de 0,5 %. Quant à l'encastrement, n'étant pas tout à fait rectangulaire, les dispersions sur les mesures de longueur et de largeur étaient respectivement de 1 mm et de 0,5 mm ce qui engendre des erreurs de 0,11 et 0,7 % respectivement. Elles sont rassemblées dans le tableau 5.4.

Géométrie	Dispersion (mm)	Erreur (%)
Longueur	1	0,11
Largeur	0,5	0,07
Epaisseur	0,01	0,5

TAB. 5.4 – Incertitudes géométriques entrant en compte pendant les mesures

L'incertitude la plus importante concerne l'épaisseur. Les erreurs sur la longueur et la largeur semblent a priori assez faibles.

Parmi les incertitudes, les conditions d'encastrement sont également à prendre en compte puisqu'en pratique elles ne sont pas idéales. Dans notre cas, les incertitudes dues à l'encastrement ne sont pas mesurables. Une erreur sur l'encastrement influence essentiellement les fréquences de résonance de la plaque [52]. Afin de compenser cette erreur, dans la suite, les signaux synthétisés seront recalés sur ceux enregistrés.

5.4 Caractéristiques des signaux enregistrés

Dans les paragraphes qui vont suivre, nous adopterons les notations suivantes pour les signaux :

- Pour les signaux enregistrés : *E-numéro du point d'impact-numéro de l'essai*.
- Pour les signaux synthétisés : *S-numéro du point d'impact-numéro de l'essai*.
- Pour les paires de signaux (signal enregistré / signal synthétisé respectif) : *P-numéro du point d'impact-numéro de l'essai*.

Par exemple, le son S-2-3 est le signal synthétisé correspondant au troisième essai du point d'impact 2.

5.4.1 Normalisation des signaux

Trois types de signaux ont été ainsi enregistrés : la fonction d'excitation, la pression et l'accélération. Leur allure générale en fonction du temps est assez répétitive. Pour chaque signal temporel (pression, accélération ou excitation), les amplitudes diffèrent d'un essai à l'autre puisque la force appliquée par l'expérimentateur n'est pas la même d'une frappe à l'autre. C'est pourquoi nous avons choisi de normaliser l'ensemble des signaux temporels en les divisant par les maximums de leur amplitude.

En ce qui concerne l'excitation, elle peut être décomposée en 3 parties sur la figure 5.5 : une partie ascendante (1), une partie descendante (2) et une dernière partie qui se situe dans les ordonnées négatives (3). Cette dernière pourrait s'interpréter comme étant de l'énergie "rendue" par la plaque au marteau dont la tête est en caoutchouc. Cette troisième partie serait ainsi la conséquence d'un effet d'hystérésis du caoutchouc. Cette excitation est modélisée par une somme de cosinus. La fonction exacte utilisée

pour la modéliser est définie au chapitre 2 (p. 46) par la formule 2.13.

Après normalisation, les différences entre les excitations se situent au niveau de la durée d'impact qui n'est pas constante d'un essai à l'autre ; elle varie de 3,45 à 4,4 ms comme l'indique le tableau 5.5. Les temps de montée et de descente sont les durées respectives des parties ascendante et descendante.

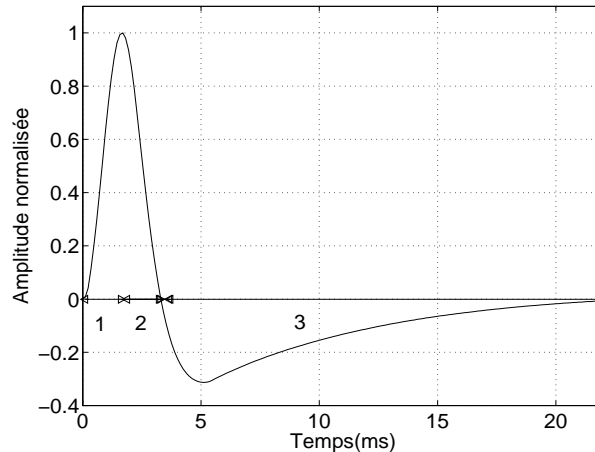


FIG. 5.5 – Représentation de l'excitation enregistrée en fonction du temps

Après normalisation, les mesures du champ de pression et de l'accélération sont assez répétitives pour un même lieu d'excitation. Cependant, pour différents essais correspondant au même point d'impact, certains signaux ont plus de composantes hautes fréquences. Ceci s'explique par les durées d'impact qui sont différentes.

5.4.2 Caractéristiques des signaux de pression enregistrés

Cette description des signaux concerne les signaux de pression enregistrés avec le microphone C2. Elle sera basée sur le son E-2-3 qui est globalement représentatif de l'ensemble des signaux enregistrés.

5.4.2.1 Analyse temporelle

D'une manière générale, les signaux sont totalement amortis au bout de 8 secondes comme le montre la figure 5.6. Les cinq premières secondes contiennent l'essentiel de l'information. C'est pourquoi, par la suite, nous nous sommes contentés des cinq premières secondes de signal permettant ainsi de diminuer la durée des tests psychoacoustiques.

Afin d'affiner l'analyse des signaux, nous avons choisi de décomposer le signal temporel en trois parties :

- une partie transitoire (les 100 premières millisecondes) sur laquelle l'amplitude maximale est atteinte,
- une partie intermédiaire (de 100 ms à 3 s) sur laquelle le signal décroît très rapidement,
- une partie amortie (de 3 à 5 s) sur laquelle le signal s'atténue plus doucement.

Noms des sons	Durées d'impact (ms)	Temps de montée (ms)	Temps de descente (ms)
E-1-1	3,6	1,85	1,75
E-1-2	3,55	1,75	1,8
E-1-3	3,7	1,8	1,9
E-2-1	3,75	1,9	1,85
E-2-2	3,7	1,85	1,85
E-2-3	3,55	1,75	1,8
E-3-1	4,4	2,1	2,3
E-3-2	4,03	1,88	2,15
E-3-3	4,35	2	2,35
E-4-1	3,9	2	1,9
E-4-2	3,75	2	1,75
E-4-3	3,55	1,85	1,7
E-5-1	3,95	1,9	2,05
E-5-2	4,15	2	2,15
E-5-3	3,65	1,8	1,85
E-6-1	3,9	1,9	2
E-6-2	3,8	1,8	2
E-6-3	3,82	1,82	2
E-7-1	4,05	1,95	2,1
E-7-2	3,8	1,8	2
E-7-3	3,45	1,7	1,75

TAB. 5.5 – Durées d'impact en millisecondes pour les différents signaux enregistrés.

Cette décomposition figure au graphique 5.7.

5.4.2.2 Analyse spectrale

La figure 5.8 présente le spectre du son E-2-3 calculé sur les 5 premières secondes. Les composantes du spectre du signal de pression sont les fréquences de résonance de la plaque. La quantité de fréquences excitées dépend du lieu d'excitation comme nous l'avons expliqué au chapitre 2. Ensuite, le niveau de ces composantes dépend en partie de la durée d'impact comme indiqué dans ce chapitre 2. Dans le tableau 5.1 figure le spectre d'une fonction d'excitation dont la durée est de l'ordre de 3 ms. Ce spectre pondère le niveau des composantes spectrales. C'est pourquoi, à la figure 5.8, les composantes présentes entre 0 et 500 Hz ont un niveau élevé alors que les composantes situées entre 500 et 800 Hz ont un niveau moins élevé. Au-delà de 800 Hz, le niveau des composantes spectrales est très faible.

5.4.2.3 Analyse du niveau de pression par bandes critiques

L'étude du signal par bandes critiques présente plus d'intérêt car le signal est décomposé en bandes de fréquence d'analyse qui sont proches de celles de l'oreille interne. La figure 5.9 présente ainsi la décroissance temporelle du niveau sonore dans les 11

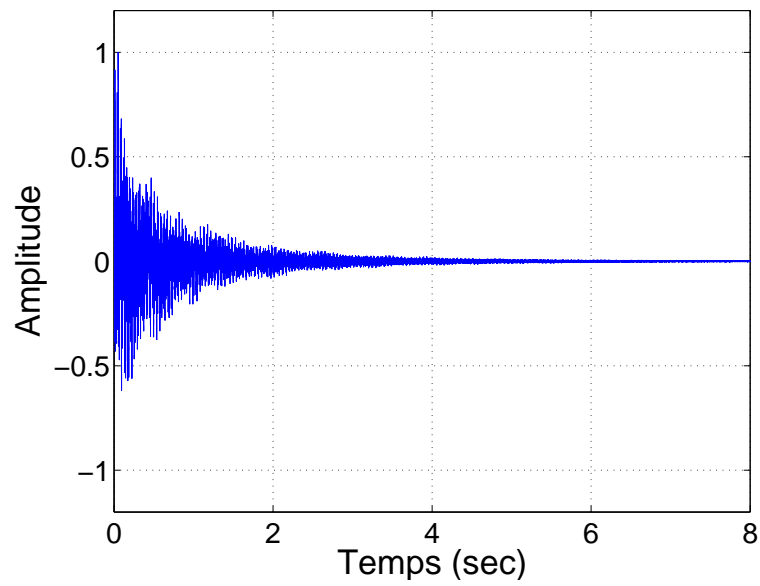


FIG. 5.6 – Signal de pression E-2-3 sur 8 s

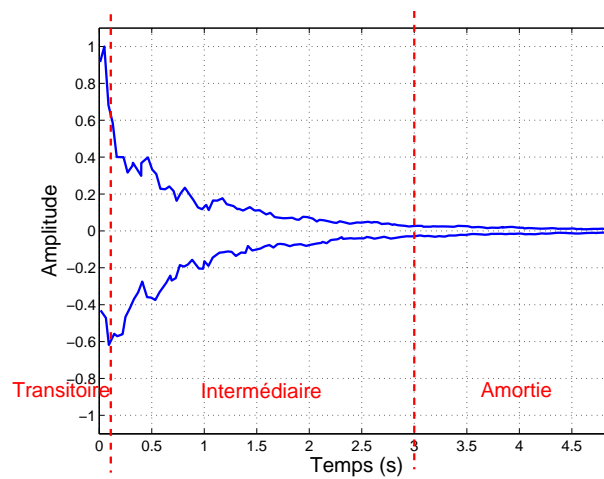


FIG. 5.7 – Décomposition en 3 parties de l'enveloppe du signal de pression E-2-3 en fonction du temps

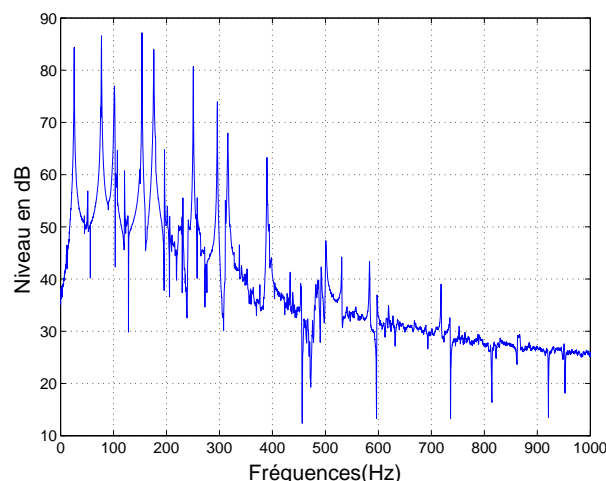


FIG. 5.8 – Spectre du signal E-2-3 calculé sur 5s

premières bandes de Bark du signal E-2-3. La délimitation des bandes critiques approchée est présentée en Annexe B.

Chaque courbe qui décrit l'énergie en fonction du temps par bande critique n'est pas tout à fait rectiligne :

- Le niveau fluctue au cours du temps car des paires de fréquences correspondant à de forts niveaux et voisines produisent des battements (dans la bande centrée sur 315 Hz par exemple).
- Entre 0 et 3s, la pente de la décroissance a un coefficient directeur qui est différent de celui de la pente de la décroissance entre 3 et 5s.

D'autre part, le niveau dans les bandes s'atténue d'autant plus vite que les fréquences centrales des bandes sont plus élevées. Ce qui est la conséquence de l'amortissement structural.

Au-delà de 3 secondes de signal, seules les quatre premières bandes ont encore de l'énergie.

5.4.2.4 Analyse temps-fréquence "sensorielle"

La figure 5.10 présente une représentation temps-fréquence "sensorielle" du son E-2-3 c'est-à-dire le niveau perçu en sones en fonction du temps selon l'échelle des Barks. L'avantage de cette représentation temps-fréquence est qu'elle traite d'une grandeur sensorielle et non plus physique. Cette courbe met entre autres en évidence les effets de masquage. Pour tracer ce graphique, la sonie spécifique a été calculée toutes les 2 ms et tous les 10^{ièmes} de bandes de Bark en utilisant le modèle de Zwicker et Fastl [27] (voir paragraphe 1.2.1 du chapitre 1).

Globalement, l'énergie est très importante (4 sones par Bark) dans les bandes 2 et 3 puis décroît progressivement dans les bandes 4 à 20. Sur les parties intermédiaire et amortie, la sonie dans les bandes 4 à 20 est une sonie de flanc ce qui signifie que l'énergie présente dans la troisième bande masque l'énergie présente dans les bandes

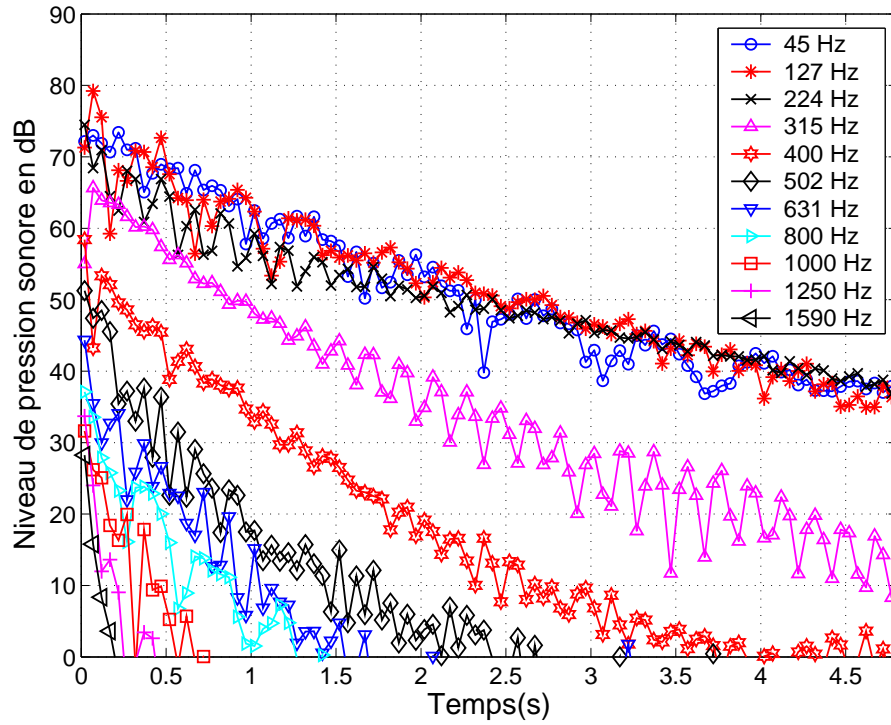


FIG. 5.9 – Décroissance du niveau du son E-2-3 dans les bandes critiques approchées. Les fréquences indiquées sont les fréquences centrales des 11 premières bandes.

supérieures. Ainsi, l'énergie des sons de fréquences situées dans les bandes 3 à 24 ne serait pas audible selon ce modèle.

5.5 Recalage des paramètres de la plaque

Des tests perceptifs préliminaires de dissemblance ont été réalisés entre les sons enregistrés et les sons synthétisés respectivement. Il résulte de ces tests, présentés en Annexe H, qu'il est difficile de juger la similarité entre un son enregistré et le son synthétisé respectif car de nombreux critères peuvent entrer en compte. Par conséquent, sachant que des incertitudes sont effectives pendant les mesures, il est nécessaire de recalibrer les sons synthétisés afin de minimiser les différences. Les paragraphes qui suivent décrivent la première étape de l'étude. Il s'agit d'identifier les critères physiques pertinents à prendre en compte dans le modèle de façon à faire concorder au mieux chaque signal synthétisé sur celui enregistré respectif. L'amortissement et l'épaisseur de la plaque sont les deux paramètres que nous avons choisis de modifier.

5.5.1 Amortissement interne de la plaque

L'amortissement structural de la plaque est pris en compte dans la partie imaginaire du module d'Young. Cette façon de décrire l'amortissement de la structure est

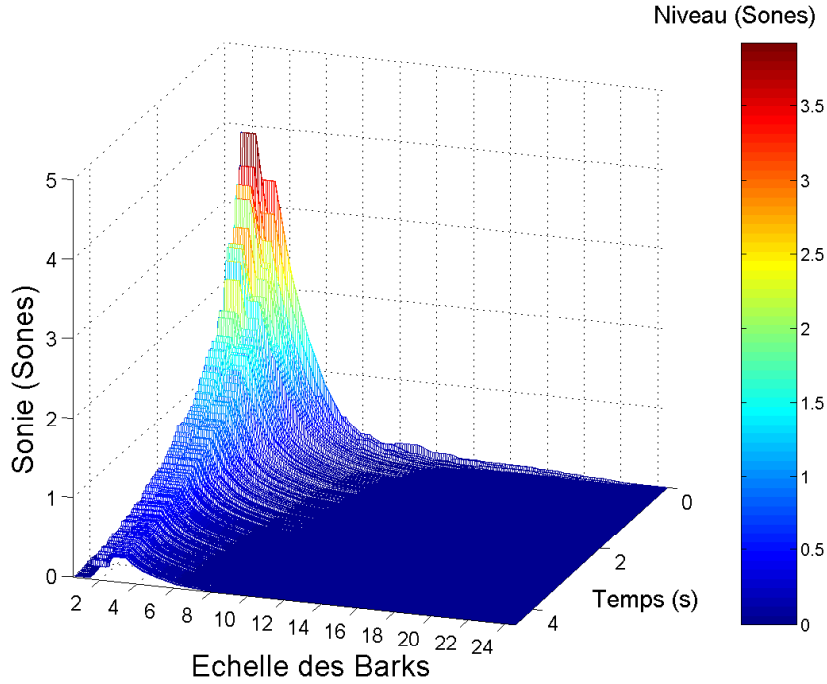


FIG. 5.10 – Temps-fréquence sensoriel du signal E-2-3

classiquement utilisée, notamment dans les calculs par éléments finis. Cependant, ce modèle n'est pas très juste car l'amortissement varie en fonction de la fréquence. Il existe des modèles plus complexes (variant en fonction de la fréquence) qui permettent de mieux modéliser cet amortissement. Un des buts de cette étude est de vérifier la pertinence de ce modèle d'un point de vue perceptif. Le but de ce paragraphe est de déterminer un amortissement η constant qui puisse décrire la décroissance de l'ensemble des signaux enregistrés.

Pour définir la valeur de l'amortissement à introduire pour la synthèse des sons, la décroissance du niveau par bandes critiques a été étudiée pour l'ensemble des signaux enregistrés suivants (un échantillon de son par point d'impact) : E-1-3, E-2-3, E-3-2, E-4-2, E-5-3, E-6-2 et E-7-3. La pente de la décroissance du niveau d'un signal n'était pas constante, comme il a été montré au paragraphe précédent. Par conséquent, nous avons choisi d'étudier seulement la partie amortie car cette partie influence fortement la sensation de décroissance puisqu'elle mène à l'extinction du signal. D'autre part, l'étude porte sur les quatre premières bandes critiques puisque ce sont les seules à avoir encore de l'énergie entre 3 et 5 secondes (voir figure 5.9). Pour chacune de ces bandes, les pentes des décroissances temporelles ont été identifiées à partir d'une régression linéaire. La figure 5.11 présente les décroissances de niveau dans ces quatre premières bandes pour le son E-2-3.

Un exemple de régression linéaire est présenté pour la 4^{ème} bande centrée sur 315 Hz. La valeur du coefficient directeur de cette droite est de 7,5. Le tableau 5.6 regroupe les valeurs des pentes "a", identifiées pour tous les signaux.

Ensuite, le spectre a été décomposé en 4 parties qui correspondent chacune à une

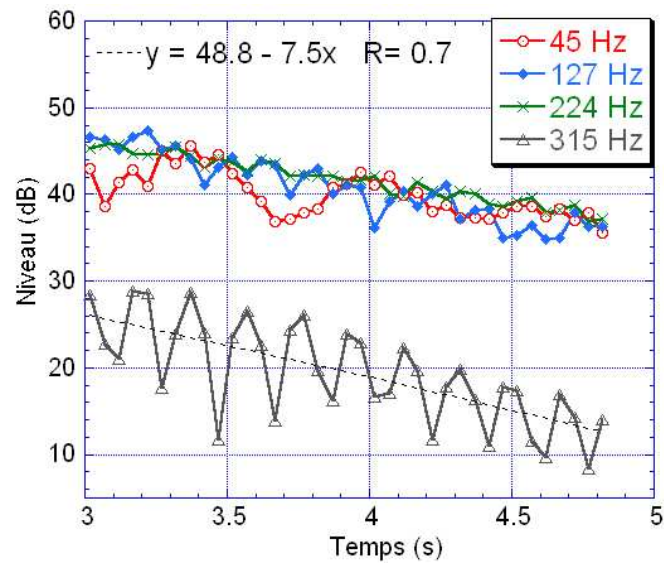


FIG. 5.11 – Décroissances du niveau dans les 4 premières bandes critiques entre 3 et 5 s pour le signal E-2-3

bande critique approchée (figure 5.12).

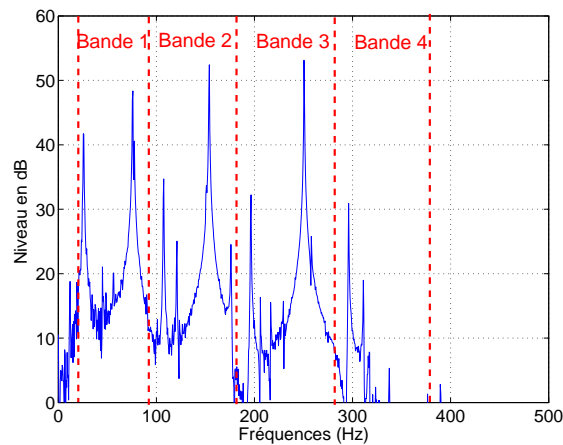


FIG. 5.12 – Spectre calculé entre 3 et 5s

Cette figure montre que l'énergie d'une fréquence "émerge" par bande critique et les valeurs de celles-ci sont alors : 77, 154, 250 et 296 Hz. Dans la première bande une composante à 25 Hz émerge également, mais nous pouvons supposer que cette composante n'est pas audible. Pour les autres signaux étudiés (pour l'ensemble des points d'impact), nous avons également constaté que ces fréquences-là émergeaient pour chaque bande critique. Pour déduire la valeur d'amortissement associée à chaque bande et à chaque signal, nous avons considéré la décroissance de niveau par bande critique. A chaque bande critique était associée la fréquence qui "émergeait". Enfin,

Nom des signaux	Bande 1 centrée sur 45 Hz		Bande 2 centrée sur 127 Hz		Bande 3 centrée sur 224 Hz		Bande 4 centrée sur 315 Hz		Valeur moyenne d'amortissement
	a	η (10^{-3})	a	η (10^{-3})	a	η (10^{-3})	a	η (10^{-3})	η_{moy} (10^{-3})
E-1-3	3,4	1,6	3,4	0,8	5,2	0,8	5,2	0,6	0,95
E-2-3	3,2	1,5	6,2	1,5	4,6	0,7	7,5	0,9	1,15
E-3-2	2,9	1,4	3,1	0,7	5	0,7	8,6	1,1	0,975
E-4-2	3,7	1,8	6,6	1,6	4,4	0,6	5	0,6	1,15
E-5-3	3,2	1,5	6,3	1,5	4,5	0,7	5,7	0,7	1,1
E-6-2	3,1	1,5	4,3	1	5,4	0,8	5,3	0,6	0,975
E-7-3	2	1	6,5	1,6	5	0,7	8,4	1	1,075

TAB. 5.6 – Pentas "a" (en dB.s⁻¹) des courbes décrivant la décroissance d'énergie en fonction du temps pour les quatre premières bandes de Bark et amortissements associés η

pour déterminer la valeur exacte de l'amortissement, nous avons utilisé la formule 5.1 déduite de l'expression 2.15 qui avait été préalablement définie au chapitre 2.

$$\eta = \frac{\ln(10)}{20\pi} \frac{a}{f_e} \quad (5.1)$$

où f_e est la fréquence "émergente" qui a l'essentiel de l'énergie dans chaque bande et "a" est la pente en dB/s. L'ensemble des amortissements calculés pour chaque signal et chaque bande est rassemblé dans le tableau 5.6. Les valeurs de l'amortissement varient d'un facteur 3 (de $0,6 \cdot 10^{-3}$ à $1,8 \cdot 10^{-3}$) suivant les bandes critiques et les lieux d'impact. Cette variation reste raisonnable pour le matériau et pour le modèle d'amortissement considérés. La dernière colonne du tableau correspond à une valeur moyenne d'amortissement correspondant à chaque signal.

Le modèle d'amortissement utilisé n'est pas idéal car nous obtenons des valeurs de η relativement différentes selon des bandes critiques. Le modèle semble trop approximatif, il faudrait peut-être utiliser un modèle qui dépend de la fréquence. Cependant, d'un point de vue perceptif, une valeur constante de η pourrait être suffisante. C'est pourquoi, par la suite, on considère qu'un η_{global} , moyenne des sept valeurs de η_{moy} , de valeur $1 \cdot 10^{-3}$, pourrait décrire l'amortissement de la structure et serait valable pour l'ensemble des points d'impact.

5.5.2 Epaisseur

Une incertitude a été mise en évidence sur les mesures d'épaisseur et les conditions d'encastrement ne sont pas réalisées de façon parfaite. Par conséquent, il est nécessaire de recalibrer les valeurs des fréquences de résonance pour le modèle de façon à compenser les erreurs sur l'encastrement et sur l'épaisseur. Pour effectuer ce recalage, nous avons choisi de modifier uniquement les valeurs de l'épaisseur de la plaque. Pour ce faire, nous faisons l'hypothèse qu'un signal enregistré et le signal de synthèse

seront recalés d'un point de vue perceptif si la fréquence de résonance de plus forte énergie du signal enregistré concorde avec celle du signal de synthèse. Ceci implique que le signal ainsi synthétisé aura une hauteur tonale qui sera la plus proche possible de celle du signal enregistré (voir chapitre 4).

Nous avons alors identifié, pour chaque son étudié, les fréquences de résonance dont les composantes spectrales ont l'énergie la plus élevée. Ces fréquences figurent au tableau 5.7. Nous constatons que ce sont les mêmes pour les points 1, 5 et 6. Pour les points 1 et 6, ceci s'explique par le fait que le point d'impact 6 est le symétrique du point 1 selon l'axe des abscisses. Les fréquences de plus forte énergie sont les mêmes pour les points 3, 4 et 7. L'épaisseur de plaque à introduire dans notre modèle a été choisie de façon à ce qu'il y ait une concordance des fréquences de plus forte énergie. Les valeurs de ces épaisseurs figurent au tableau 5.7. Deux épaisseurs équivalentes de 1,86 et 1,92 mm ont ainsi été identifiées.

L'obtention de deux valeurs pourrait paraître contestable puisqu'on étudie la même plaque, mais l'intérêt est de recaler au mieux les sons synthétisés sur ceux enregistrés de façon à minimiser les différences perceptives.

Sons	F_{max} (Hz)	h_{eq} (mm)
E-1-n	176	1,86
E-2-n	77,25	1,86
E-3-n	153,75	1,92
E-4-n	153,75	1,92
E-5-n	176	1,86
E-6-n	176	1,86
E-7-n	153,75	1,92

TAB. 5.7 – Fréquences correspondant au niveau d'amplitude le plus élevé (F_{max}) et épaisseurs de plaques équivalentes (h_{eq}) pour chaque son étudié. L'indice n prend les valeurs 1, 2 ou 3.

5.6 Différences objectives

Cette partie présente la seconde étape de l'étude. Il s'agit d'évaluer les différences temporelles et spectrales entre sons enregistrés et synthétisés. Les paramètres d'entrée du modèle ont été ajustés pour tenir compte des résultats du paragraphe précédent. Ainsi, les sons ont été calculés avec un amortissement égal à 10^{-3} et une épaisseur égale à 1,86 ou 1,92 mm suivant les signaux (voir tableau 5.7). Pour le calcul, 200 modes ont été pris en compte.

L'étude est restreinte aux mêmes sons qu'au paragraphe 5.5 à savoir les sons : E-1-3, E-2-3, E-3-2, E-4-2, E-5-3, E-6-2 et E-7-3.

5.6.1 Différences entre les composantes spectrales

Evaluer les différences entre les composantes spectrales consiste à évaluer les différences entre les fréquences de résonance enregistrées et celles synthétisées. Après avoir identifié dans le paragraphe 5.5.2 les valeurs d'épaisseur à introduire dans le modèle afin de recaler au mieux les composantes spectrales de plus forte énergie, nous pouvons désormais évaluer les différences entre les fréquences de résonances correspondant aux mesures et celles synthétisées.

Afin de quantifier ces différences, nous avons calculé les différences relatives $\Delta f/f$ entre les deux sons, à chaque fréquence de résonance c'est-à-dire pour chaque mode k . Les calculs ont été effectués sur les 35 premiers modes car, sur 5 secondes, ils correspondent aux fréquences de plus forte énergie dans le signal. L'expression de $\Delta f/f$ est donnée par la relation 5.2 où f_m et f_s sont respectivement les fréquences de résonance mesurées (identifiées lors des mesures) et synthétisées.

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_k = \frac{(f_m)_k - (f_s)_k}{(f_m)_k} \quad \forall k \in [1; 35] \quad (5.2)$$

Le graphique 5.13 présente ces différences relatives de fréquences $\Delta f/f$ en fonction des fréquences de résonance mesurées f_m .

Pour les calculs effectués en considérant une épaisseur de 1,86 mm, les valeurs de $\Delta f/f$ varient entre $-0,5 \cdot 10^{-2}$ et $+7 \cdot 10^{-2}$. Elles sont proches de zéro à 77,25 et 176 Hz puisque le choix de l'épaisseur pour la synthèse a été établi afin qu'il y ait une concordance de ces fréquences particulières. Pour les calculs réalisés en considérant une épaisseur de 1,92 mm, les valeurs vont de $-4 \cdot 10^{-2}$ à $+4 \cdot 10^{-2}$. Le point d'abscisse 153,75 Hz est également proche de zéro puisque cette épaisseur a été aussi choisie pour la synthèse afin qu'il y ait une concordance à cette fréquence. Une grande partie des valeurs de $|\Delta f/f|$ est supérieure au seuil de discrimination fréquentiel. En effet, dans cette bande de fréquence le seuil de discrimination fréquentiel $|\Delta f/f|$ est de l'ordre de $\approx 10^{-2}$ [62]. Ce seuil varie selon la fréquence et le niveau [63], selon les individus [64] et peut être amélioré avec de l'entraînement [65]. Ceci laisse supposer que les sons enregistrés et ceux synthétisés pourraient être perçus légèrement différemment.

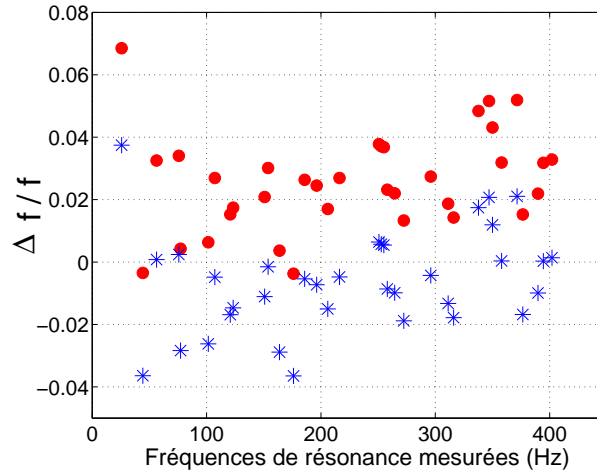


FIG. 5.13 – Différences relatives de fréquences $\Delta f/f$, en fonction des fréquences de résonance mesurées, pour une épaisseur de 1,86 mm (●) et de 1,92 mm (*)

5.6.2 Différences entre les enveloppes temporelles

Une comparaison entre signaux enregistrés et synthétisés de pression rayonnés par des plaques a été faite mais portant seulement sur les 4 premières millisecondes de signal [66]. Dans ce paragraphe, nous comparons les enveloppes temporelles des deux types de signaux. La figure 5.14 présente les enveloppes temporelles des signaux enregistrés et synthétisés. Les tracés de ces enveloppes ont été réalisés en reliant les maxima calculés sur les signaux de pression dans chaque intervalle de temps Δt . Les valeurs de Δt étaient variables suivant les signaux et variaient de 10 à 70 ms de façon à obtenir une représentation de l'enveloppe la plus lissée possible.

L'intérêt est de vérifier si la valeur d'amortissement global que nous avons choisie engendre une concordance des enveloppes temporelles des sons enregistrés et synthétisés.

Parmi les graphiques de la figure 5.14, trois cas se présentent.

- Le premier concerne la paire de signaux E-4-2/S-4-2. La décroissance de l'enveloppe temporelle du signal synthétisé concorde avec celle du signal enregistré. Ceci signifie que la valeur d'amortissement moyen choisie pour la synthèse à partir de nos critères correspond à une bonne décroissance temporelle du signal mesuré sur toute la durée du signal.
- Le second cas de figure concerne les paires E-1-3/S-1-3, E-3-2/S-3-2 et E-6-2/S-6-2. Les décroissances temporelles des signaux synthétisés et enregistrés sont différentes sur la partie intermédiaire mais identiques sur la partie amortie. La valeur numérique d'amortissement, définie sur la partie amortie, n'est pas bien adaptée pour décrire la partie intermédiaire.
- Le dernier cas concerne les paires E-2-3/S-2-3, E-5-2/S-5-2 et E-7-3/S-7-3 où les signaux synthétisés ne semblent pas suffisamment amortis. En effet, les décroissances des enveloppes temporelles sont plus rapides dans le cas de la mesure que dans celui de la synthèse. La valeur d'amortissement que nous avons choisie est donc insuffisante pour ces signaux.

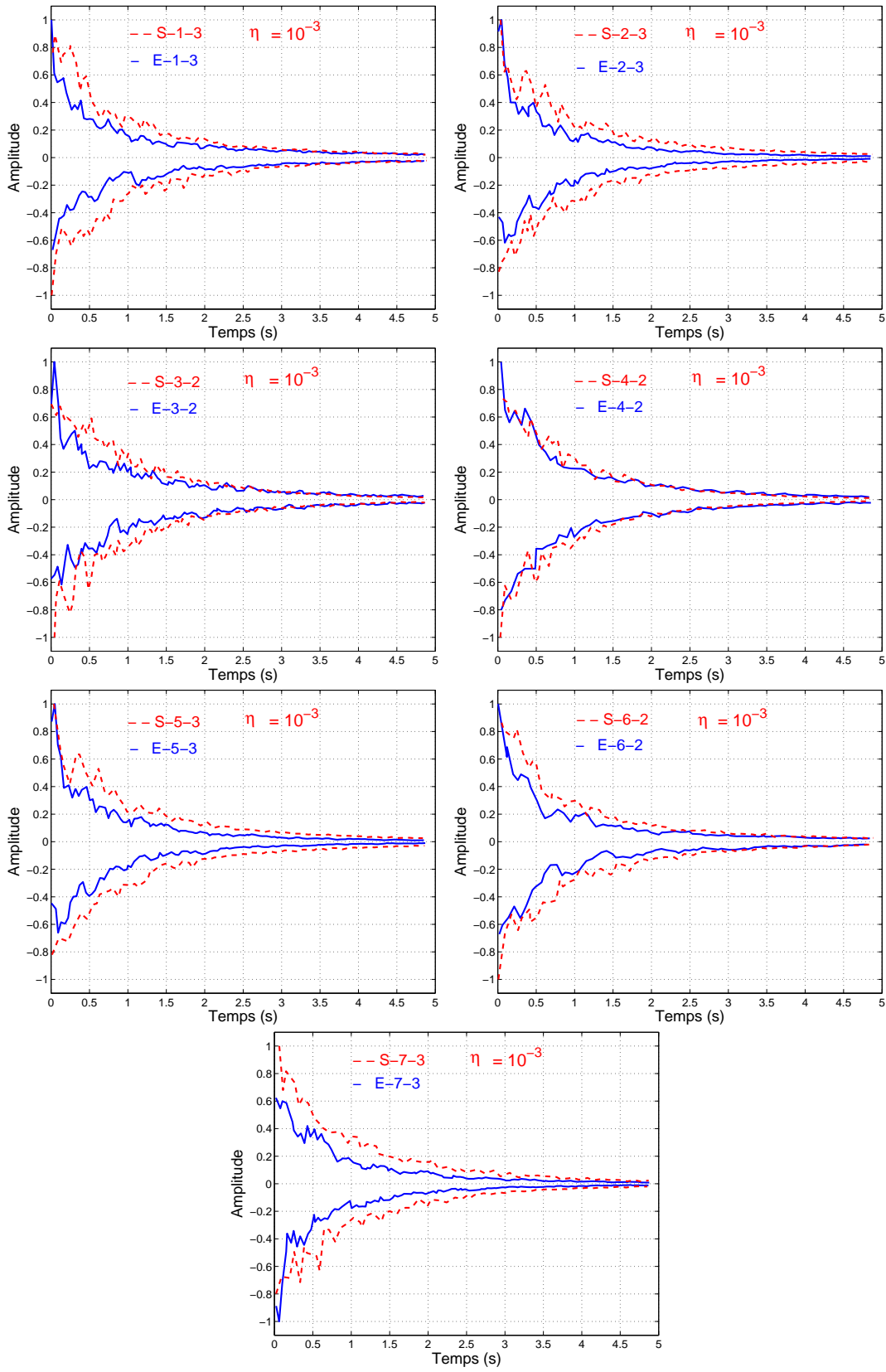


FIG. 5.14 – Enveloppes temporelles des signaux de pression enregistrés et synthétisés

Ces divergences de résultats posent le problème suivant : pourquoi les décroissances concordent pour certains signaux correspondant à certains points d'impacts et pas pour d'autres ?

L'amortissement variant en fonction des modes en est probablement la cause. Cependant, les valeurs d'amortissement ont été recalées sur la partie amortie. Pourtant, les signaux ne concordent pas toujours sur cette portion. Les valeurs moyennes d'amortissement (colonne de droite du tableau 5.6) variant de $0,95 \cdot 10^{-3}$ à $1,15 \cdot 10^{-3}$ sont très proches de la valeur globale égale à 10^{-3} . En revanche, les valeurs d'amortissement, pour un même signal, varient d'un facteur 3 dans les différentes bandes critiques, ce qui pourrait expliquer les différences.

La valeur d'amortissement a été déterminée en étudiant les décroissances de niveau des sons enregistrés dans les quatre premières bandes critiques. Si l'on compare ces chutes de niveau pour chaque son enregistré et chaque son synthétisé on constate que les décroissances concordent dans les bandes 2, 3 et 4. Cependant, des différences existent dans la première bande sur les graphiques de la figure 5.15.

Les trois cas de figure décrits précédemment se retrouvent :

- Dans le cas des signaux E-4-2/S-4-2, les courbes sont assez proches bien que le signal synthétisé soit plus amorti sur la dernière seconde.
- Pour les paires E-1-3/S-1-3 et E-6-2/S-6-2, les courbes sont proches sur la partie amortie (les pentes des décroissances sont très proches). En revanche, pour les paires E-3-2/S-3-2 et E-6-2/S-6-2, sur la partie intermédiaire, des différences de fluctuation de niveau sont visibles.
- Pour les paires E-2-3/S-2-3, E-5-2/S-5-2 et E-7-3/S-7-3, les signaux enregistrés sont plus amortis que les signaux synthétisés sur toute la durée du signal.

Les différences de décroissance des enveloppes temporelles sont liées aux décroissances de niveau dans la première bande critique. Dans le paragraphe suivant, une comparaison des spectres va nous permettre de connaître l'origine de ces divergences.

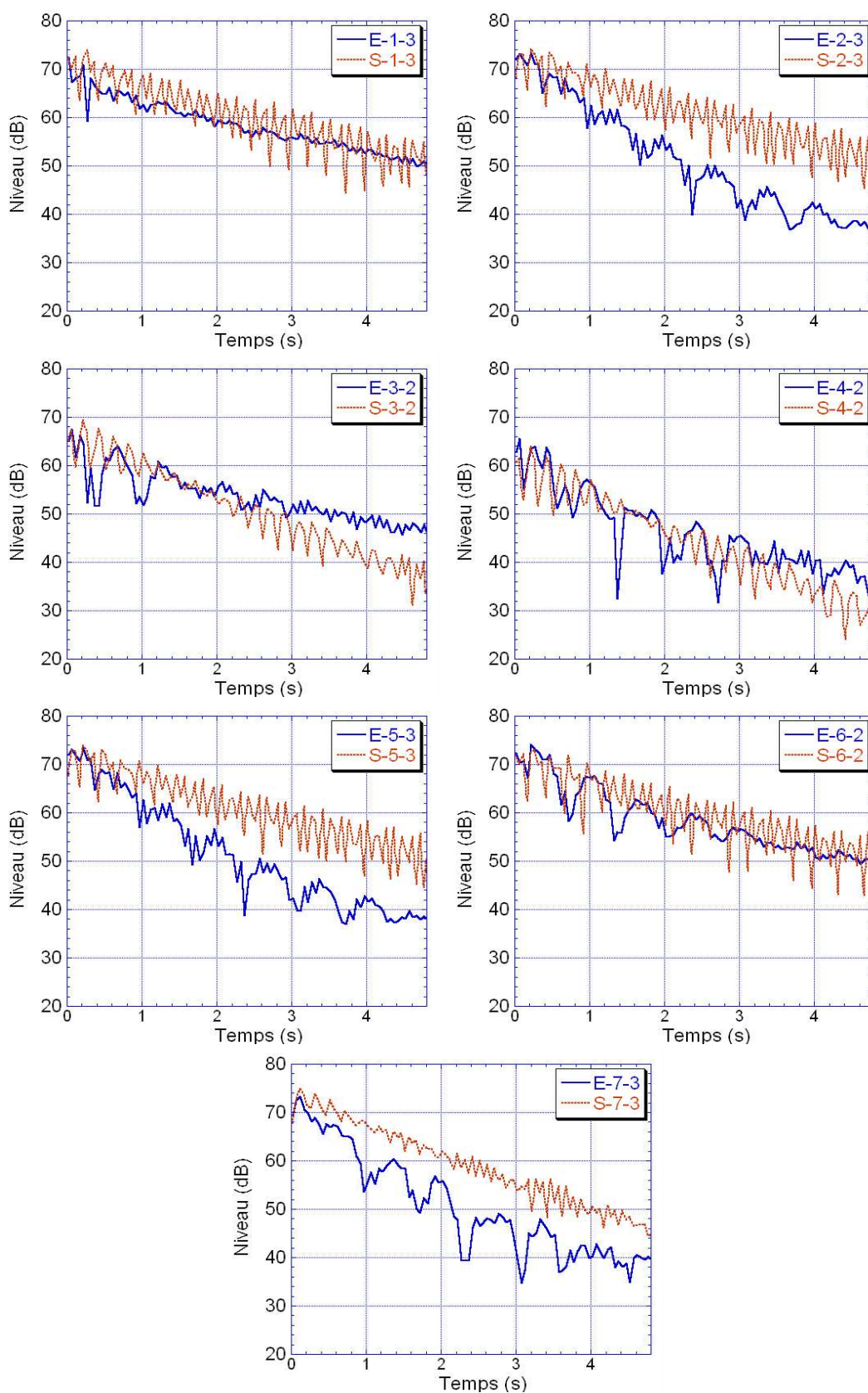


FIG. 5.15 – Décroissance de niveau en dB en fonction du temps dans la bande centrée sur 45 Hz, pour l'ensemble des sons étudiés

5.6.3 Différences de niveau sonore à chaque composante spectrale

Dans ce paragraphe, un bilan des différences de niveau entre les spectres (calculés par transformée de Fourier discrète) des signaux de pression calculés et mesurés est présenté. Ces spectres ont été calculés sur chacune des 3 parties du signal présentées auparavant (voir p.99), à savoir : sur les parties transitoire, intermédiaire puis amortie. Nous avons choisi d'évaluer les différences de niveau ΔN_i , aux résonances, entre le spectre du signal synthétisé et celui du signal enregistré (voir Annexe I). Cette différence, définie par l'expression 5.3, est exprimée en décibel.

$$\Delta N_i = (N_s)_i - (N_m)_i \quad i = 1 \dots NC \quad (5.3)$$

NC est le nombre de composantes spectrales.

Pour une résonance fixée, la barre verticale orientée vers les niveaux croissants ($\Delta N > 0$) signifie que le signal synthétisé a un niveau plus élevé de ΔN dB que celui enregistré.

Le tableau 5.8 regroupe les valeurs de deux indices pour chaque partie des signaux et chaque paire de signaux : $|\Delta N|_{moyen}$ et $(\Delta N)_{total}$. Le premier, $|\Delta N|_{moyen}$, défini par l'expression 5.4 est un indice qui indique les écarts moyens de niveau. Le second, $(\Delta N)_{total}$, défini par la relation 5.5 est la somme des valeurs ΔN_i . Si sa valeur est positive, cela signifie que les niveaux des signaux synthétisés sont dans l'ensemble supérieurs à ceux enregistrés.

$$|\Delta N|_{moyen} = \frac{1}{NC} \sum_{i=1}^{NC} |\Delta N_i| \quad (5.4)$$

$$(\Delta N)_{total} = \sum_{i=1}^{NC} (\Delta N_i) \quad (5.5)$$

Paires de sons	Partie Transitoire		Partie Intermédiaire		Partie Amortie	
	$ \Delta N _{moyen}$	$(\Delta N)_{total}$	$ \Delta N _{moyen}$	$(\Delta N)_{total}$	$ \Delta N _{moyen}$	$(\Delta N)_{total}$
P-1-3	5,5	28	6,4	99	10,3	51
P-2-3	6,3	34	6,4	39	11,3	30
P-3-2	6,9	88	8,3	114	7,6	7
P-4-2	5,5	52	8,1	40	7,1	-8
P-5-3	5,2	31	8,7	130	12,7	95
P-6-2	4,9	17	8,3	81	10,2	49
P-7-3	5,6	49	8,2	82	9,9	105
Moyennes	5,7	43	7,8	84	9,9	47

TAB. 5.8 – Valeurs de $|\Delta N|_{moyen}$ et $(\Delta N)_{total}$ pour chaque portion de signal et chaque paire de signaux

Deux principales remarques se déduisent du tableau 5.8 :

- Les valeurs de $(\Delta N)_{total}$ sont positives pour chaque partie de signal et pour l'ensemble des paires de signaux (excepté pour la paire P-4-2 dans la partie amortie). Globalement, les niveaux des composantes des signaux synthétisés ne sont donc pas suffisamment amortis.
- Les valeurs moyennes de $|\Delta N|_{moyen}$ augmentent progressivement de la partie transitoire à la partie amortie (de 5,7 à 9,9 dB). Les différences de niveaux sur l'ensemble des composantes sont plus importantes sur la partie amortie.

Une analyse paire par paire montre que les écarts sont très faibles pour la paire P-3-2 et P-4-2 sur la partie amortie. Sur la portion intermédiaire les valeurs sont équivalentes (de 6,4 à 8,7 dB).

Une analyse plus détaillée sur chaque portion est également présentée en Annexe I.

5.6.4 Discussion

Le modèle d'amortissement que nous avons utilisé donne de bons résultats pour la paire P-4-2 (enveloppes temporelles et différences de niveau) sur toute la durée du signal. Cependant, pour les autres signaux, on peut se demander pourquoi on obtient de si fortes différences de niveaux et de décroissance des enveloppes temporelles, sur la portion amortie, alors que les valeurs d'amortissement ont été choisies de façon à recalcr les signaux sur cette portion. La réponse se décompose essentiellement en trois points :

- L'amortissement par rayonnement n'a pas été pris en compte. En effet, lorsque nous avons calculé les pentes pour déterminer des valeurs d'amortissements globales, nous avons supposé que l'amortissement par rayonnement était bien décrit. Par conséquent, si la valeur d'amortissement par rayonnement est incorrecte (ce qui est parfois le cas, voir Annexe I) alors des erreurs entrent en compte dans le calcul.
- Le recalage de l'amortissement a été effectué sur les quatre premières bandes critiques si bien que le niveau des sons synthétisés n'est pas atténué dans la cinquième bande critique (voir Annexe I).
- Les fréquences de plus forts niveaux que nous avons déterminées dans le paragraphe 5.5.1 pour les sons enregistrés ne sont pas les mêmes pour les sons synthéti-

sés. Par exemple, dans la partie amortie, la fréquence qui émerge dans la première bande de Bark vaut 25 Hz pour le son S-2-3 et 77 Hz pour le son E-2-3.

D'autre part, de faibles différences sur la partie amortie (donc un bon recalage) n'implique pas forcément de faibles différences sur la partie intermédiaire. Le recalage a été fait en ne considérant que la partie amortie, il faudrait également tenir compte d'un recalage sur la portion intermédiaire.

Ceci montre les limites de la façon que nous avons eue de choisir la valeur d'amortissement. Cependant, une validation perceptive va être entreprise afin de déterminer quelles peuvent être les ressemblances ou dissemblances liées à l'amortissement.

5.6.5 Conclusion

Les différences/ressemblances objectives ont été établies entre les paires de sons. L'ensemble des résultats est regroupé dans le tableau 5.9.

Noms des signaux	Décroissance temporelle	$ \Delta f/f $	ΔN transitoire	ΔN intermédiaire	ΔN amortie
P-1-3	Bonne dans la partie amortie	$< 7.10^{-2}$	faibles	importantes	élevées
P-2-3	Mauvaise	$< 7.10^{-2}$	faibles	importantes	élevées
P-3-2	Bonne dans la partie amortie	$< 4.10^{-2}$	élevées	importantes	faibles
P-4-2	Bonne	$< 4.10^{-2}$	faibles	importantes	faibles
P-5-3	Mauvaise	$< 7.10^{-2}$	faibles	importantes	élevées
P-6-2	Bonne dans la partie amortie	$< 7.10^{-2}$	faibles	importantes	élevées
P-7-3	Mauvaise	$< 4.10^{-2}$	faible	importantes	élevées

TAB. 5.9 – Tableau récapitulatif des dissemblances/ressemblances temporelles et spectrales entre les signaux de pression enregistrés et synthétisés

Dans le paragraphe 5.5.2, nous avons identifié deux valeurs d'épaisseurs de 1,86 et 1,92 mm qui correspondent à un recalage des fréquences de résonance de plus fort niveau. Ainsi, les différences fréquentielles relatives $\Delta f/f$ ont été établies pour chaque mode. En valeur absolue, ces valeurs sont inférieures à 4.10^{-2} pour les paires P-3-2, P-4-2 et P-7-3 et à 7.10^{-2} pour les autres. Bien qu'elles soient faibles, ces valeurs restent supérieures au seuil de discrimination fréquentiel qui est de l'ordre de 10^{-2} . Ceci implique que les sons enregistrés et les sons synthétisés pourraient être perçus légèrement différemment.

Dans la partie 5.5, une valeur d'amortissement structural "globale" égale à 10^{-3} a également été définie. Nous avons alors identifié les différences qui subsistent tant d'un point de vue temporel que d'un point de vue spectral. En ce qui concerne la partie temporelle, les décroissances des enveloppes des signaux enregistrés et synthétisés concordaient sur toute la durée pour une paire de signaux, concordaient sur la partie amortie pour 3 autres paires de signaux. En revanche, elles étaient différentes sur toute la durée pour les 3 paires de signaux restants. L'amortissement semble in-

correctement évalué dans ces 3 derniers cas.

En ce qui concerne les différences d'un point de vue spectral, nous avons relevé les différences de niveau à chaque résonance et pour chaque partie de signal. Les différences sont relativement faibles dans la partie transitoire, plus importantes dans la partie intermédiaire et plus ou moins élevées dans la partie amortie suivant les points d'impact. Les conclusions pour la partie amortie rejoignent celles décrites pour les décroissances temporelles. Il semble que la valeur de l'amortissement soit insuffisante dans le cas de certains signaux. Les limites de notre façon de définir la valeur d'amortissement ont été mises en évidence.

Une fois ces différences/ressemblances établies, l'intérêt de l'étude est de savoir si ces différences sont audibles. Est-ce que les différences en fréquences sont perceptibles ? Quel est le meilleur recalage des paramètres d'un point de vue perceptif ?

Dans la partie suivante, nous tenterons de répondre à ces questions.

5.7 Dissemblances perceptives

Les aspects perceptifs sont abordés dans ce paragraphe en soulevant deux problèmes qui concernent :

- La détermination du nombre de modes "optimal" à prendre en compte pour le calcul. Parmi les signaux que nous avons choisi d'étudier dans le détail, nous souhaitons connaître le domaine fréquentiel à prendre en compte dans les calculs pour que le signal synthétisé soit le plus proche possible du signal enregistré. Pour définir ce domaine, nous avons effectué des tests de dissemblances entre un son enregistré et ce même son enregistré filtré "passe-bas" à différentes fréquences de coupure. Ainsi, nous avons pu définir le domaine fréquentiel à décrire dans le modèle et en déduire le nombre de modes à prendre en compte dans le calcul.
- La détermination du meilleur recalage des paramètres de façon à minimiser les différences perceptives entre sons enregistrés et synthétisés. Seulement le son E-3-2 a été testé. Un test de dissemblance a été réalisé entre ce son enregistré et N sons de synthèse simulés avec différentes valeurs d'amortissement et d'épaisseur. Quatre tests ont été effectués au total. Chacun portait sur une portion différente du signal (transitoire, intermédiaire et amortie) et un sur la totalité du signal. Les résultats ont été soumis à une analyse multidimensionnelle. Tout d'abord, elle a permis d'identifier les critères perceptifs utilisés par les sujets lors de leurs jugements. Ensuite, elle a permis de connaître le son de synthèse le plus proche du son enregistré suivant chaque dimension. Par conséquent, nous avons pu en déduire les valeurs des paramètres à introduire dans le modèle afin que le son de synthèse soit le plus semblable possible au son enregistré.

5.7.1 Détermination du domaine fréquentiel à prendre en compte pour la synthèse

Dans cette partie, nous souhaitons connaître le domaine fréquentiel à prendre en compte dans la synthèse afin que le signal calculé soit le plus semblable possible à celui enregistré. Une solution serait de décrire tout le champ auditif normal. Seulement cette prise en compte serait très onéreuse en temps de calcul.

En effet, le domaine fréquentiel à décrire dépend du nombre de modes pris en compte. Le temps de calcul est d'autant plus important que le nombre de modes pris en compte est plus élevé. Plus le domaine fréquentiel est grand, plus le nombre de modes est important, plus la durée des calculs est longue. Ce nombre de modes est donc l'un des paramètres importants à prendre en compte pour la synthèse du champ de pression rayonné par la plaque en termes de temps de calcul et de justesse.

Pour évaluer le domaine de fréquence à modéliser, nous avons testé trois sons enregistrés : E-2-3, E-1-3 et E-3-2.

5.7.1.1 Sujets

Vingt et un sujets ont participé à l'expérience qui concernait le son E-2-3 et 19 ont participé à celle des sons E-1-3 et E-3-2. Ils étaient membres du laboratoire ou étudiants, tous bénévoles et avaient un audiogramme normal. Ils étaient âgés de 21 à 46 ans.

5.7.1.2 Sons

Dans un premier temps, l'étude portait sur le son E-2-3. Deux extraits de ce signal de durée 500 ms, ont été étudiés :

- Le premier correspond aux 500 premières millisecondes du signal qui comporte toute la richesse spectrale du son. Par la suite, ce son portera le nom de E-2-3-trans.
- La seconde partie correspond au signal allant de 50 à 550 millisecondes. Ici, la partie transitoire est absente si bien que le signal est moins brillant. Néanmoins, ce signal reste riche au niveau spectral. Ce son portera le nom E-2-3-non-trans.

Le décalage de ces deux signaux a été choisi afin d'évaluer l'impact de la partie transitoire sur les dissemblances perçues. La durée des signaux E-2-3-trans et E-2-3-non-trans a été réduite à 500 millisecondes car c'est la partie la plus riche. Au-delà de cette durée, l'amortissement de la structure entre en compte si bien que le signal comporte de moins en moins de composantes.

Dans un second temps, les sons E-1-3 et E-3-2 ont également été testés.

Ces trois sons correspondent à des points d'impact bien distincts (du coin vers le centre). Ils ont été choisis afin de savoir si les résultats obtenus pour un son brillant (impact dans un coin de la plaque) étaient similaires à ceux obtenus pour un son plus mat (impact au centre de la plaque).

Chacun d'entre eux a été filtré avec un filtre passe-bas aux fréquences de coupure suivantes : 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1500, 2000, 4000, 6000 et 8000 Hz. Le filtrage a été effectué en utilisant le logiciel LEA (voir Annexe F). Quatorze sons ont ainsi été pris en compte, pour chaque test.

L'ensemble des sons a été égalisé en sonie, à l'écoute par les expérimentateurs, de sorte que ce paramètre n'entre pas en compte pour les jugements de dissemblances.

5.7.1.3 Protocole

Les sujets devaient juger les dissemblances entre le son non filtré et chacun des 13 sons filtrés correspondants. Le son non filtré était aussi comparé à lui-même, afin d'obtenir un étalonnage du jugement "très semblable". Une méthode de comparaison par paires a été utilisée pour évaluer les dissemblances entre les sons. L'ordre de passage des sons et des paires était aléatoire. Le matériel ainsi que la procédure utilisés pour évaluer les dissemblances étaient les mêmes que ceux présentés au chapitre 3.

Les auditeurs avaient pour consigne d'utiliser toute la dynamique proposée par l'échelle. Afin que les sujets puissent se familiariser avec cette tâche de dissemblances, une première écoute des sons puis un test d'entraînement leur a été proposé en début de test. La durée d'un test était de l'ordre de 2 minutes.

5.7.1.4 Résultats et interprétation

La figure 5.16 regroupe les résultats des moyennes de dissemblances concernant les sons E-1-3, E-3-2, E-2-3-trans et E-2-3-non-trans en fonction des fréquences de coupure du filtre.

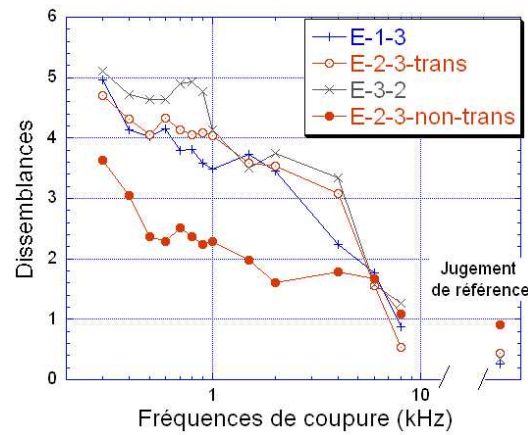


FIG. 5.16 – Comparaison des jugements de dissemblances des sons étudiés en fonction des fréquences de coupure des filtres

Les deux courbes des sons E-2-3-non-trans et E-2-3-trans ont des allures différentes. La courbe du son E-2-3-non-trans est plus "aplatie" que celle du son E-2-3-trans. Les dissemblances entre le son non filtré et les sons filtrés sont plus faibles pour le son E-2-3-non-trans que pour le son E-2-3-trans pour des fréquences de coupure inférieures à 6000 Hz. Ainsi, un saut de dissemblance est observé entre 6000 et 1000 Hz dans le cas du signal E-2-3-trans, mais est absent pour le signal E-2-3-non-trans. Comme on pouvait s'y attendre, la partie transitoire a un effet sur les jugements de dissemblances. En effet, la partie transitoire a le plus de composantes hautes fréquences comme nous le voyons sur la représentation temps-fréquence de la figure 5.17. Par conséquent, le filtrage a plus d'influence sur le signal avec transitoire que sans.

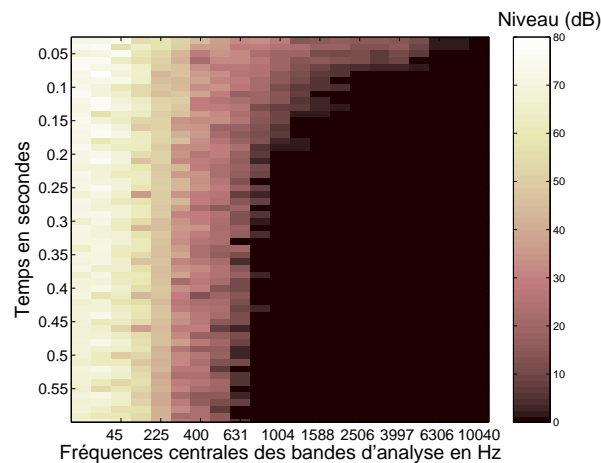


FIG. 5.17 – Représentation temps-fréquence du son E-2-3-trans

En ce qui concerne les sons E-1-3 et E-3-2, les moyennes des jugements sont très proches de celle du son E-2-3-trans comme le montre la figure 5.16. Par conséquent, les

résultats sont similaires pour les sons correspondant à différentes positions d'impact. Pour une interprétation plus détaillée des jugements, nous allons focaliser notre étude sur le signal E-2-3-trans.

Pour les jugements, les sujets avaient pour consigne d'utiliser toute l'échelle proposée à l'écran. Or, certains d'entre eux ont eu des difficultés à respecter cette consigne. Ceci a pour conséquence d'augmenter les écarts-types de la moyenne de l'ensemble des jugements. C'est pourquoi les jugements ont été normalisés. Pour chaque sujet, nous avons divisé chaque jugement par la plus grande estimation. Par conséquent, nous avons fait correspondre le jugement le plus dissemblable à la valeur 1 pour chaque sujet. La figure 5.18 présente la moyenne de ces jugements de dissemblances normalisés en fonction des fréquences de coupure des filtres pour le son E-2-3-trans uniquement. Les barres verticales représentent les écarts-types.

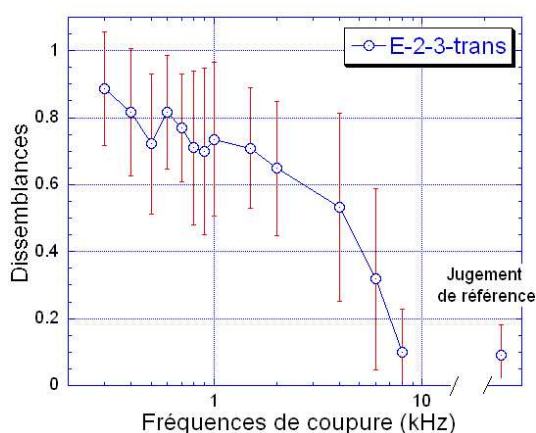


FIG. 5.18 – Dissemblances normalisées pour l'étude du son E-2-3-trans en fonction des fréquences de coupure des filtres

Sur la figure 5.18, le point en bas à droite du graphique, d'ordonnée 0,1, correspond au jugement de dissemblance du signal non filtré E-2-3-trans lorsqu'il est comparé à lui-même (jugement de référence). La dissemblance entre le son filtré à 8000 Hz et le son non filtré est la même que celle du jugement de référence. Le son filtré à 8000 Hz est donc très semblable au signal non filtré. En revanche, il y a un saut de dissemblance entre les sons filtrés à 8000 et à 1500 Hz, dû à la présence, dans le spectre, de composantes peu intenses mais audibles entre 1500 Hz et 8000 Hz (figure 5.17).

Au graphique (a) de la figure 5.19 qui présente la sonie spécifique calculée sur les 100 premières millisecondes du signal, la présence entre les bandes 10 et 22 (au-delà de 1000 Hz) d'une faible sonie laisse supposer que ces composantes sont effectivement perceptibles.

A la figure 5.18, un palier de dissemblances apparaît entre 400 et 1000 Hz ; le signal filtré à 400 Hz diffère peu, subjectivement, de ceux filtrés entre 500 et 1000 Hz. L'énergie d'une composante à 390 Hz que l'on peut voir au graphique (b) de la figure 5.19, masque peut-être celle des composantes situées entre 400 et 1000 Hz. Cet effet de masquage apparaît également au graphique (a) de la figure 5.19 puisque la

sonie de flanc domine entre les bandes 4 et 10 (entre 315 et 1000 Hz).

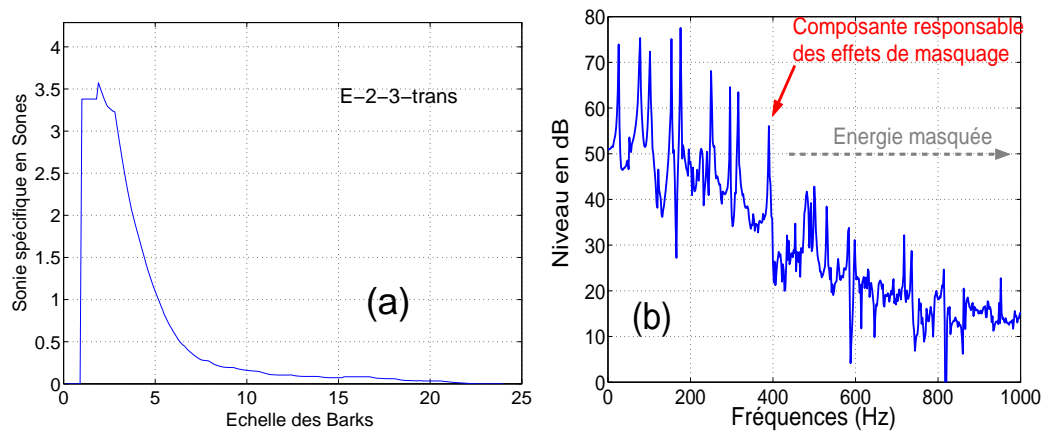


FIG. 5.19 – Sonie spécifique calculée sur les 100 premières millisecondes selon l'échelle des Barks (a) et spectre du son E-2-3-non-trans (b)

5.7.1.5 Prédiction du domaine audible

Les conclusions de ces expériences sont basées sur l'analyse de 3 sons testés. Pour objectiver les résultats, nous avons tenté de corrélérer ces jugements à un critère objectif : la densité de sonie. Les graphiques de la figure 5.20 présentent les dissemblances moyennes normalisées en fonction des sonies spécifiques de l'ensemble des sons calculées sur les 100 premières millisecondes de signal et sommées entre les bandes de Bark 4 et 24 (de 315 à 15500 Hz). Nous avons effectué le calcul sur les 100 premières millisecondes puisque cette portion comporte le maximum d'énergie jusqu'à 8000 Hz. La somme a été effectuée dans les bandes 4 et 24 car ce sont celles qui sont affectées par le filtrage.

Pour chacun des 3 sons, la corrélation entre la grandeur perceptive et le paramètre objectif est raisonnablement bonne puisqu'elle varie de 0,8 à 0,87. Cependant, la densité de sonie ne peut pas être considérée comme un estimateur exact, notamment lorsque les dissemblances sont proches de 0, sur la figure 5.20.

Par contre, un graphique de densité de sonie tel qu'il est présenté au graphique (a) de la figure 5.19 reste un bon indicateur de ce qui est audible ou pas dans le signal. De plus, cette représentation met en évidence les effets de masquage.

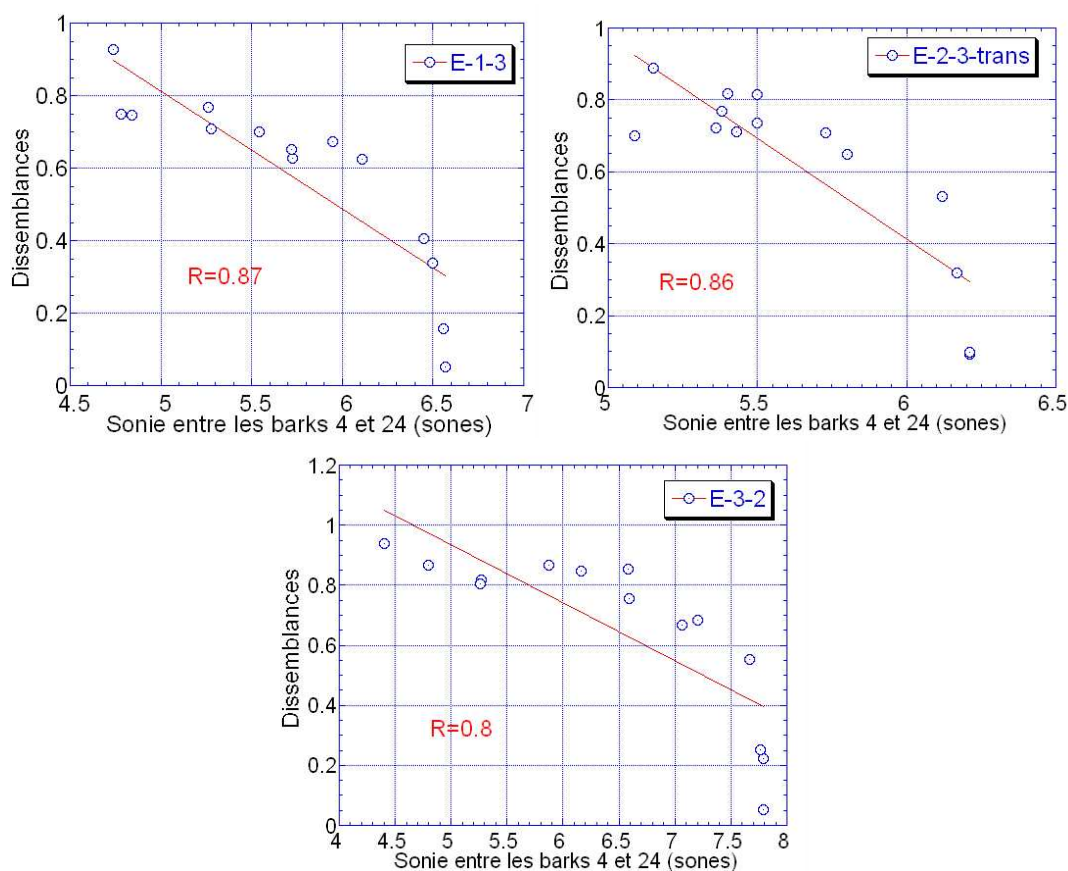


FIG. 5.20 – Dissemblances entre les sons non filtrés E-1-3, E-2-3-trans et E-3-2 et les sons filtrés en fonction des densités de sonie calculées sur 100 ms et sommées entre les Barks 4 et 22

5.7.1.6 Conclusions

Trois sons ont été testés. Les résultats de jugements de dissemblance mettent en évidence les points suivants :

- Le domaine spectral audible des sons testés s'étend jusqu'à 8000 Hz.
- La principale cause des dissemblances entre sons filtrés et non filtrés résulte du filtrage des composantes peu intenses mais audibles situées entre 1500 et 8000 Hz.
- Ces composantes sont principalement audibles dans la partie transitoire. Quand celle-ci est supprimée les dissemblances diminuent nettement.
- Des effets de masquage sont mis en évidence entre 400 et 1000 Hz. Par conséquent, la présence de composantes dans cette bande de fréquence ne modifie pas la perception du signal.
- La densité de sonie permet de contrôler dans quelle bande de fréquence le signal est audible et met en évidence les effets de masquage.

Ces résultats sont bien sûr très dépendants du type de signal étudié, notamment de la composition du spectre (position des fréquences de résonance).

5.7.2 Identification des valeurs des paramètres minimisant les dissemblances perceptives

Cette partie présente la dernière étape de l'étude. Le but est de déterminer le meilleur recalage des paramètres du modèle de façon à minimiser les dissemblances perceptives. Des tests de dissemblance ont été menés, entre un son enregistré et N autres sons de synthèse. Pour les calculs, nous avons fait varier trois paramètres :

- L'épaisseur, afin de savoir si la valeur "équivalente" que nous avons déterminée au paragraphe 5.5.2 correspond au meilleur recalage perceptif.
- L'amortissement, pour définir la valeur qui correspond au meilleur recalage perceptif.
- Les dimensions de la plaque (longueur et largeur); une écoute préalable des sons enregistrés et des sons synthétisés a montré que des différences de fluctuation de niveau étaient perceptibles. Ces différences sont également visibles sur les enveloppes temporelles de la figure 5.14. Nous avons choisi de recaler les battements du son synthétisé sur ceux du son enregistré en modifiant les longueur et largeur de la plaque de façon à faire concorder les écarts entre les deux fréquences responsables des battements. Ceci revient à recaler la fréquence de modulation du son synthétisé sur celle du son enregistré.

Quatre tests ont été menés. Le premier portait sur la durée totale des signaux et les trois derniers sur les trois portions de signal (transitoire, intermédiaire et amortie).

5.7.2.1 Sujets

Vingt-deux sujets ont pris part à la totalité des quatre tests. Ils étaient âgés de 23 à 58 ans, membres du laboratoire et bénévoles.

5.7.2.2 Sons

Le test a été effectué sur le son enregistré E-3-2 car il fait partie des 3 sons étudiés pour la détermination du domaine de fréquence à prendre en compte dans le calcul. Un bruit de fond était audible si bien que ce son a été débruité par un filtrage du bruit, à l'aide du logiciel LEA (voir Annexe F).

Puis, nous avons synthétisé 32 sons (avec différentes valeurs d'amortissement, d'épaisseur et de dimensions) sur 5 secondes. Certains d'entre eux pouvaient être très semblables au son enregistré selon des critères temporels ou spectraux (déterminés au paragraphe 5.5). Les calculs ont été effectués sur 572 modes permettant ainsi de reproduire le domaine de fréquences que nous avons déterminé dans l'expérience précédente (jusqu'à 8000 Hz environ).

Afin de choisir un nombre plus limité de signaux, nous avons mené une expérience préliminaire avec une dizaine de sujets. L'ensemble des sons pouvait être écouté en cliquant sur des icônes situées sur un écran d'ordinateur. L'icône du son enregistré était placé au centre de l'écran et celles de 32 sons de synthèse étaient disposées sur les côtés. Les sujets devaient indiquer le ou les sons de synthèse qui leur paraissaient les plus semblables au son enregistré. A l'aide du jugement de ces sujets nous avons choisi un premier groupe d'une dizaine de sons. Ensuite, nous avons ajouté 6 autres

sons dont les paramètres étaient proches de ceux des sons du premier groupe.

Le test a porté sur 17 sons au total : un enregistré, le son E-3-2 portant le numéro 17, et 16 synthétisés. Les caractéristiques géométriques et mécaniques que nous avons fait varier pour les sons de synthèse sont présentées au tableau 5.10.

Numéros des sons	Caractéristiques					
	Mécaniques et géométriques				Acoustiques	
	h(mm)	L_y (cm)	L_x (cm)	η (10^{-3})	F_{max} (Hz)	F_{mod} (Hz)
1	1,92	89,275	75,45	1	154,5	4,2
2	1,92	89,275	75,45	1,8	154,5	4,2
3	2,00	89,275	75,45	0,7	161	4,4
4	2,00	89,275	75,45	1,4	161	4,4
5	1,92	89	75,45	0,7	155	5,2
6	1,92	89	75,45	1,4	155	5,2
7	1,70	89,275	75,2	1	137,2	2,9
8	1,70	89,275	75,2	1,8	137,2	2,9
9	1,86	89,275	75,2	1,8	150,2	3,1
10	1,86	89,275	75,2	1,4	150,2	3,1
11	1,86	89,275	75,2	1	150,2	3,1
12	1,86	89,275	75,2	0,7	150,2	3,1
13	1,92	89,275	75,2	1,8	155,2	3,2
14	1,92	89,275	75,2	1,4	155,2	3,2
15	1,92	89,275	75,2	1	155,2	3,2
16	1,92	89,275	75,2	0,7	155,2	3,2
17	?	?	?	?	153,7	3

TAB. 5.10 – Caractéristiques mécaniques et géométriques des plaques : épaisseurs h , Longueurs L_y , largeur L_x et amortissements η . Caractéristiques acoustiques des sons : composantes spectrales de plus forte amplitude (F_{max}) et fréquences de modulation (F_{mod}). Les points d'interrogations pour le son 17 signifient que ce sont les valeurs à déterminer à la fin de l'expérience pour le signal enregistré.

Les valeurs des paramètres varient dans des intervalles dans lesquels les valeurs équivalentes seraient susceptibles de se trouver : de 1,7 à 2 mm pour l'épaisseur et de $0,7 \cdot 10^{-3}$ à $1,8 \cdot 10^{-3}$ pour l'amortissement. Deux valeurs de longueur et de largeur ont été choisies. Les longueurs étaient de 89 cm (L_y -0,3%) ou 89,275 cm (L_y) et les largeurs de 75,2 cm (L_x -0,3%) ou 75,45 cm (L_x). La modification de chacun de ces paramètres géométriques et mécaniques de la plaque engendre une modification des paramètres acoustiques des signaux, notamment, la fréquence de modulation (déterminées au paragraphe 1.2.5 du chapitre 1) variant de 2,9 à 5,2 Hz et la composante spectrale de plus forte amplitude variant de 137,2 à 161 Hz. Elles figurent également au tableau 5.10.

Nous pouvons remarquer que les signaux dont les fréquences de modulation sont les plus proches de celles du signal enregistré sont les signaux 7 à 12. Ceux dont la composante spectrale de plus forte amplitude est la plus proche de celle du signal enregistré sont les sons 1 et 2.

Afin de mettre précisément en évidence les ressemblances/dissemblances des sons, nous avons choisi de traiter indépendamment les trois parties distinctes des signaux : transitoires (sur 100 ms), intermédiaires (sur 2,9 s) et amorties (sur 2 s). Nous avons également choisi de tester le signal en entier afin de savoir si les dissemblances sur la totalité des sons étaient corrélées aux dissemblances obtenues séparément sur les 3 parties de signaux.

Les sons de 5s ont été égalisés en sonie avant le test, à l'écoute. En revanche, le niveau des différentes portions de signal n'a pas été modifié si bien que les signaux des portions intermédiaires et amorties pouvaient avoir des sonies différentes.

5.7.2.3 Procédure

Quatre tests ont été menés, chacun portant sur une partie différente de signal.

Pour chacun d'entre eux, la procédure ainsi que le matériel utilisé étaient ceux présentés au chapitre 3. Les sons étaient présentés par paires et de façon aléatoire. Toutes les paires possibles entre les 17 sons étaient présentées à l'auditeur, de façon aléatoire et dans un seul ordre. Au total, 136 paires ($16 \times 17 / 2$) ont été testées pour chaque test. La durée du test sur la partie transitoire était de 15 minutes environ, de 25 minutes sur la partie intermédiaire, de 20 minutes environ sur la partie amortie et de 40 minutes environ pour le signal testé dans sa totalité. L'ordre de passage des 4 tests était aléatoire. Les sujets ont effectué l'expérience complète en plusieurs fois et des pauses leur étaient proposées en milieu de test.

5.7.2.4 Résultats et interprétation

Les matrices de dissemblances ont été traitées par la méthode d'analyse multidimensionnelle utilisée et présentée au chapitre 3. L'analyse des éboulis des contraintes a permis d'estimer un nombre de dimensions expliquant les dissemblances entre les sons pour chaque partie de son testée. Le tableau 5.11 indique ce nombre de dimensions résultant de chaque test.

Portion de signal testée	Nombre de dimensions
Transitoire	2
Intermédiaire	3
Amortie	3
Totalité	2

TAB. 5.11 – Nombre de dimensions obtenu à partir de l'analyse de l'ébouli des contraintes.

La position des sons obtenue par analyse multidimensionnelle dans les quatre espaces est présentée sur les figures 5.21, 5.22, 5.23 et 5.24.

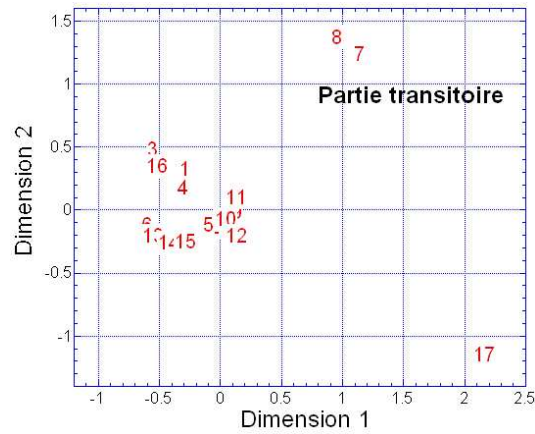


FIG. 5.21 – Position des sons dans l'espace associé à la portion transitoire des signaux

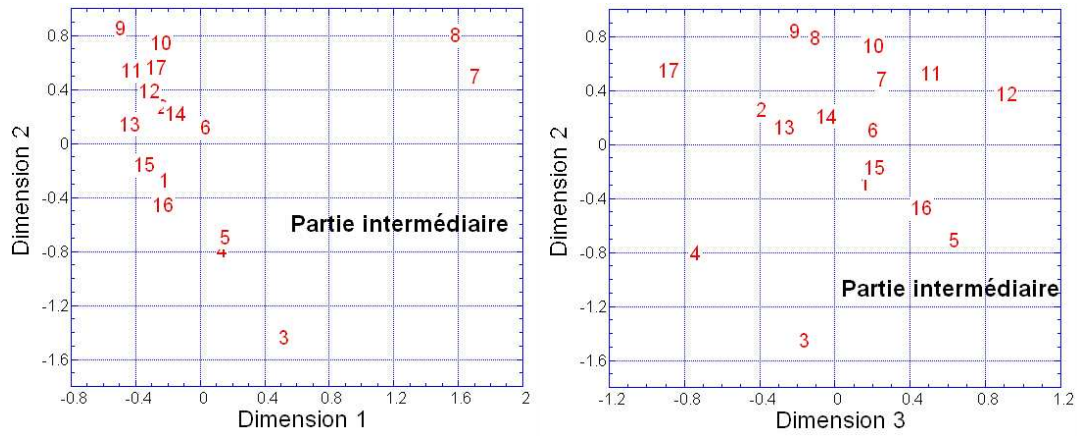


FIG. 5.22 – Position des sons dans l'espace associé à la portion intermédiaire

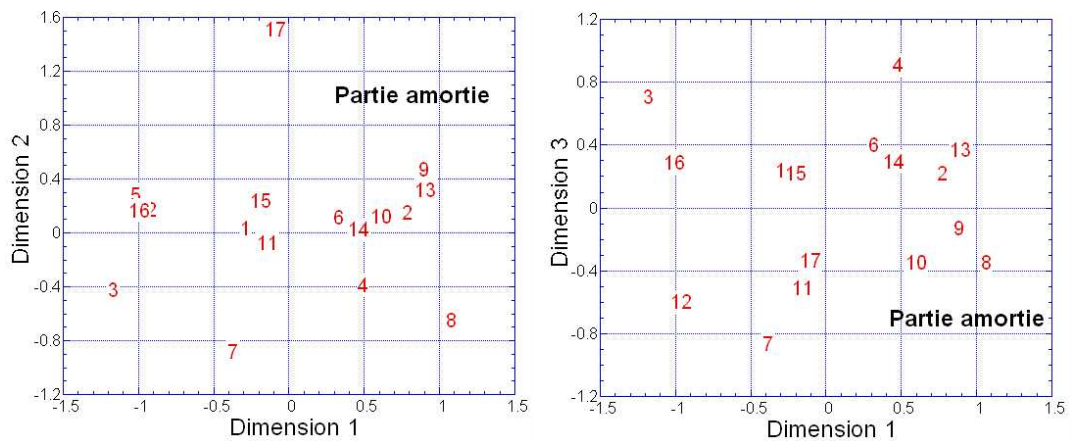


FIG. 5.23 – Position des sons dans l'espace associé à la portion amortie

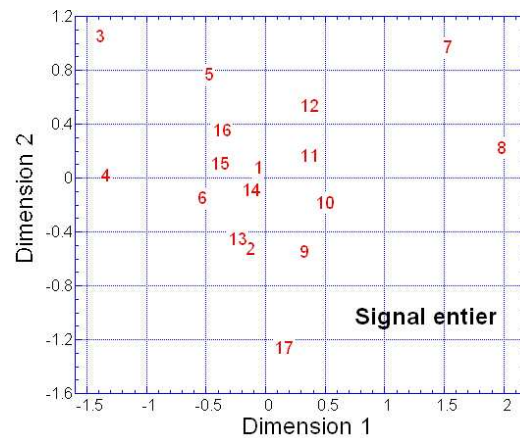


FIG. 5.24 – Position des sons dans l'espace associé au signal entier

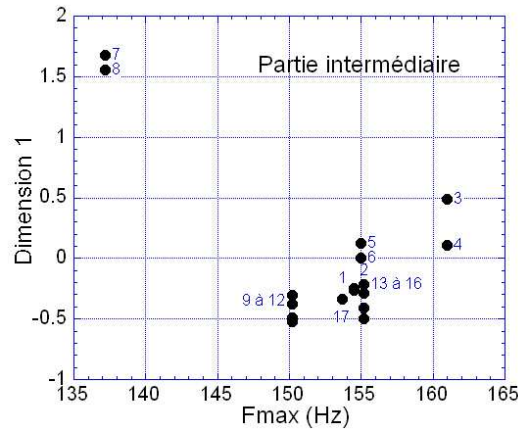
Partie transitoire Trois groupes de sons se distinguent selon les deux dimensions : le groupe 1 (son 17), le groupe 2 (sons 7 et 8) et le groupe 3 (le reste des sons).

La dimension 1 semble être liée à la hauteur tonale des sons. À l'écoute, la hauteur des sons semble diminuer lorsqu'on écoute les sons du groupe 3, puis ceux du groupe 2 puis le son 17.

La dimension 2 n'a pas été interprétée à ce stade de l'étude. Il se peut que le son 17 et les sons 7 et 8 aient une spécificité par rapport aux autres sons si bien qu'ils sont isolés suivant cette dimension.

Partie intermédiaire Dimension 1 : hauteur tonale

À l'écoute, la dimension 1 semble liée à la hauteur tonale des sons. Le long de cette dimension, les sons sont répartis en deux groupes. D'une part, les sons 7 et 8 et d'autre part les autres sons. La valeur de F_{max} (137,2 Hz) des sons 7 et 8 est très basse par rapport à celles des autres sons. La figure 5.25 montre que la dimension 1 et les valeurs de F_{max} sont globalement liées. Les sons 7 et 8 pourraient avoir une hauteur tonale si différente des autres que ce pourrait être le critère de dissemblance utilisé par les sujets selon cette dimension. Cette dimension est également liée à l'épaisseur puisque les valeurs de F_{max} sont directement influencées par les valeurs d'épaisseur.

FIG. 5.25 – Dimension 1 en fonction des valeurs de F_{max}

Dimension 2 : fluctuations de niveau, géométrie et amortissement. Cette dimension est liée à la rapidité des battements. A une extrémité de cette dimension se situe le son 3 dont la fréquence de modulation est de 4,4 Hz. A l'opposé de cette dimension se trouvent les sons 7 à 11 pour lesquels la fréquence de modulation varie de 2,9 à 3,1 Hz. Cependant, la corrélation entre la dimension 2 et les fréquences de modulation n'est pas bonne (voir figure J.1 en Annexe J). Ceci est dû au fait que l'amortissement intervient aussi dans la dimension 2. En effet, la position des sons 8 et 7, 9 à 12, 13 à 16, 4 et 3, 6 et 5 évolue suivant la valeur d'amortissement. L'amortissement a un effet sur la perception des fluctuations de niveau. Plus la valeur d'amortissement est basse, moins le son est amorti, plus les fluctuations de niveau sont perceptibles. La seconde dimension est donc liée aux fluctuations de niveau perçues. Ces dernières dépendent de l'amortissement et des fréquences de modulation. C'est ce que montre une régression multiple ($R=0,77$) : $\text{Dimension 2} = -0,54 F_{mod} + 0,46 \eta$.

Cette dimension liée essentiellement aux fréquences de modulation dépend donc de la géométrie des plaques.

Dimension 3 : Sensation de décroissance, amortissement et épaisseur. Cette dimension est liée à la décroissance des signaux résultant essentiellement de l'effet de l'amortissement. En effet, pour des valeurs d'épaisseur constantes, la position des sons selon la dimension 3 évolue selon les abscisses croissantes pour une diminution de l'amortissement. C'est le cas des sons 9 à 12 et des sons 13 à 16 par exemple. Cependant, l'amortissement n'est pas le seul paramètre à influencer cette dimension. En effet, les sons n'ont pas la même position sur la dimension 3 pour des mêmes valeurs d'amortissement (voir figure 5.26). Notamment, les sons 12, 5 et 3 ($\eta = 0,7 \cdot 10^{-3}$) correspondant à des variations d'épaisseur de 1,86 à 2 mm, ont des abscisses qui varient respectivement de 0,9 à -0,3.

La figure 5.26 présente la dimension 3 en fonction des valeurs d'amortissement. Les droites présentent les régressions linéaires entre la position des sons selon la dimension 3 et l'amortissement, pour des valeurs d'épaisseur constantes. La dimension 3 dépend donc de l'amortissement et de l'épaisseur, ce qui est confirmé par une régression

multiple ($R=0,8$) : dimension 3 = $-0,41 h - 0,77 \eta$.

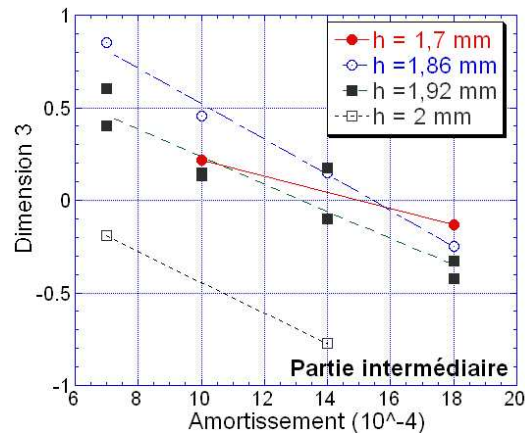


FIG. 5.26 – Dimension 3 de la portion intermédiaire et amortissement pour différentes valeurs d'épaisseur. En cercles pleins $h = 1,7$ mm, en cercles vides $h = 1,86$ mm, en carrés pleins $h = 1,92$ mm et en carrés vides $h = 2$ mm

Partie amortie Dimension 1 : sonie et amortissement. Cette dimension est liée à la sonie des sons qui a été calculée en utilisant le modèle de Zwicker et Fastl [27] décrit au paragraphe 1.2.1 du chapitre 1. Les sons 2, 8, 9 et 13, d'un côté de la dimension, ont les sonies les plus faibles (de l'ordre de 64 phones) alors que les sons 3, 5, 12 et 16, de l'autre côté de la dimension, ont les sonies les plus élevées (79 phones environ). Le graphique 5.27 présente la corrélation, égale à 0,97, entre la position des sons selon la dimension 1 et la sonie des sons, en phones.

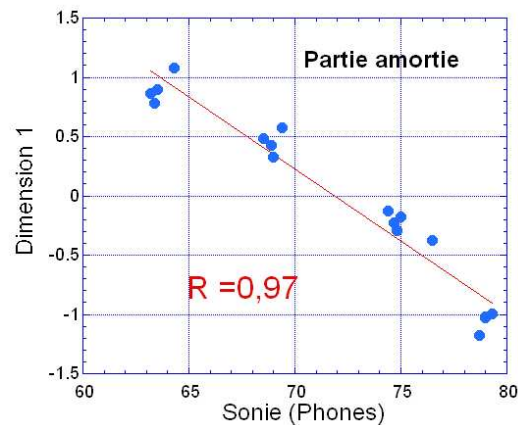


FIG. 5.27 – Résultats sur la portion amortie du signal : corrélation entre la dimension 1 et la sonie des sons

Cette variation de sonie résulte de l'effet de la variation de l'amortissement. En effet, l'amortissement correspondant aux sons 2, 8, 9 et 13 vaut $1,8 \cdot 10^{-3}$ alors que celui

celui des sons 3, 5, 12 et 16 vaut $0,7 \cdot 10^{-3}$. La figure 5.28 présente la corrélation, égale à 0,98, entre la position des sons selon la dimension 1 et l'amortissement correspondant aux sons.

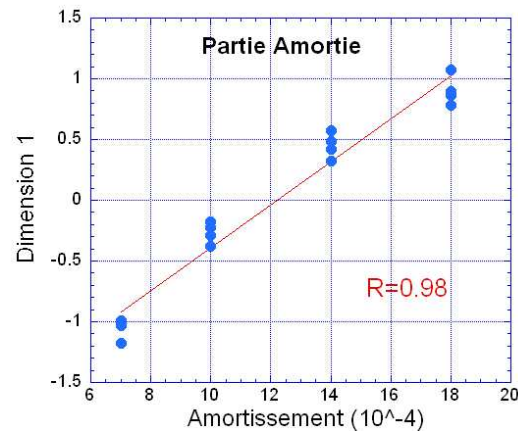


FIG. 5.28 – Résultats sur la portion amortie du signal : corrélation entre la dimension 1 et l'amortissement correspondants aux sons

Dimension 2 : bruit de fond. Le son 17 est isolé alors que les autres sons sont regroupés de l'autre côté. Le signal enregistré avait été débruité. Ce débruitage n'était pas "parfait" mais nous paraissait suffisant. Cependant, pour des valeurs d'amortissement importantes, le niveau de certains sons était faible voire inaudible. Nous avons donc choisi d'amplifier le niveau des sons de 10 dB, entraînant une hausse du bruit de fond du son 17 qui devenait perceptible. Il se peut donc que cette dimension soit liée à la présence du bruit de fond, faussant ainsi les jugements.

Dimension 3 : hauteur tonale, fréquence de plus fort niveau et épaisseur.

Cette dimension est liée à la hauteur tonale et à la fréquence des composantes ayant le plus de niveau (F_{max}). Les sons correspondant à des valeurs extrêmes de F_{max} (sons 3-4 et 7-8) sont situés aux deux extrémités de la dimension. La figure 5.29 présente la corrélation ($R=0,85$) entre la dimension 3 et les valeurs de F_{max} . La variation de F_{max} résulte directement de la modification de l'épaisseur des plaques.

Signal complet Dimension 1 : hauteur tonale, fréquence de plus fort niveau et épaisseur. Comme la dimension 3 de la partie amortie, la dimension 1 du signal complet semble liée à la hauteur tonale des sons. En effet, la hauteur augmente lorsqu'on écoute les sons des plus faibles abscisses (sons 3 et 4) vers les abscisses les plus élevées (sons 7 et 8). Le paramètre acoustique associé à cette variation de hauteur tonale est la fréquence ayant le plus fort niveau. En effet, les sons correspondant aux valeurs extrêmes de F_{max} sont opposés sur la dimension 1. Les autres signaux, pour des valeurs intermédiaires, se situent au centre de cette dimension proportionnellement aux valeurs de F_{max} . Le graphique sur la figure 5.30 montre que la dimension 1 est corrélée à F_{max} ($R=0,98$).

La corrélation entre la première dimension de l'étude du signal complet et la dimension 3 de l'espace correspondant à la partie amortie est établie au graphique 5.31. La hauteur tonale du signal sur la partie amortie est donc représentative de la hauteur tonale du signal complet. En revanche, la dimension 1 correspondant à la portion transitoire et la dimension 1 de la portion intermédiaire ne sont pas corrélées à la

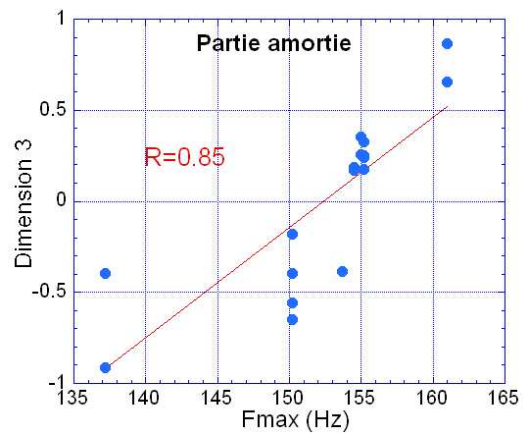


FIG. 5.29 – Résultats sur la portion amortie du signal : corrélation entre la dimension 3 et F_{max}

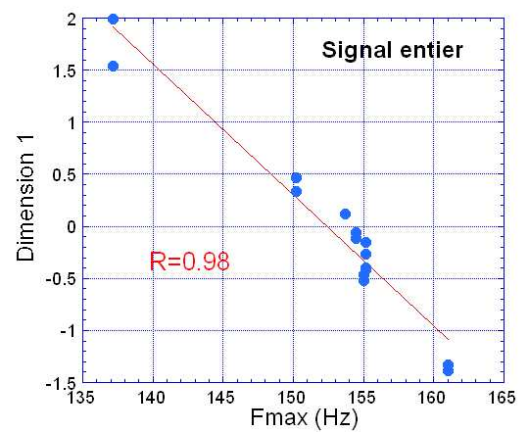


FIG. 5.30 – Résultats sur le signal complet : corrélation entre la dimension 1 et F_{max}

dimension 1 du signal entier.

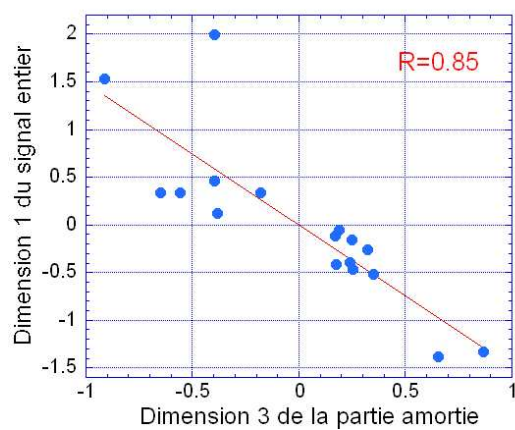


FIG. 5.31 – Corrélation entre la dimension 1 du signal entier et la dimension 3 de la partie amortie

Dimension 2 : sensation de décroissance, amortissement et épaisseur.

Cette dimension semble être liée à la décroissance des signaux résultant essentiellement de l'effet de l'amortissement comme dans le cas de la dimension 3 de la partie intermédiaire. En effet, pour des valeurs d'épaisseur constantes, la position des sons selon la dimension 2 évolue selon les abscisses décroissantes pour une augmentation de l'amortissement. Par exemple, c'est le cas des sons 9 à 12 et des sons 7 et 8. Cependant, l'amortissement n'est pas le seul paramètre à influencer cette dimension. Pour des valeurs d'amortissement constantes, la position des sons évolue selon les abscisses décroissantes pour une augmentation de l'épaisseur. Notamment, les sons 7, 11 et 15 ($\eta = 10^{-3}$) correspondant à des variations d'épaisseur de 1,7 à 1,92 mm, ont des abscisses qui varient de 1 à 0,1.

La figure 5.32 présente la dimension 2 en fonction des valeurs d'amortissement. Les droites présentent les régressions linéaires entre la position des sons selon la dimension 3 en fonction de l'amortissement, pour des valeurs d'épaisseur constantes. La dimension 2 dépend de l'amortissement et de l'épaisseur ce qui est confirmé par une régression multiple ($R=0,86$) : $\text{Dimension 2} = -0,33 h - 0,86 \eta$.

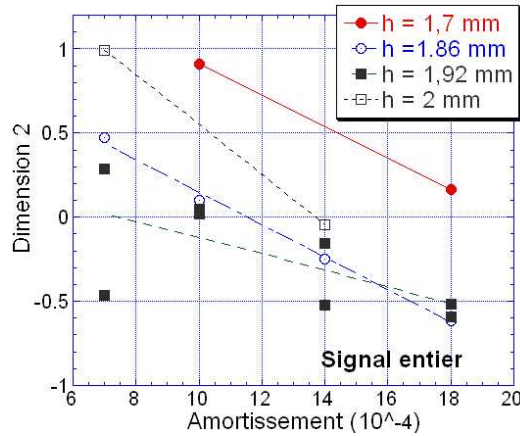


FIG. 5.32 – Dimension 2 et amortissement pour différentes valeurs d'épaisseur. En cercles pleins $h = 1,7$ mm, en cercles vides $h = 1,86$ mm, en carrés pleins $h = 1,92$ mm et en carrés vides $h = 2$ mm

Une corrélation a été établie entre la seconde dimension de l'espace du signal complet et la troisième dimension de l'espace de la portion intermédiaire comme le montre le graphique 5.33. Les dissemblances perçues sur la partie intermédiaire et liées à la variation d'amortissement sont représentatives des dissemblances perçues sur le signal complet.

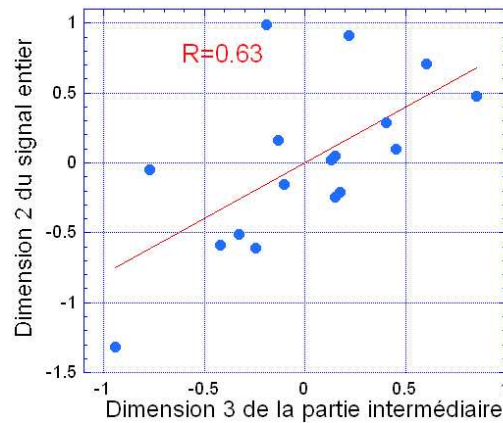


FIG. 5.33 – Corrélation entre la dimension 2 du signal entier et la dimension 3 de la partie intermédiaire

5.7.2.5 Identification des caractéristiques du son enregistré

Dans ce paragraphe, les valeurs des paramètres du son de synthèse le plus semblable vont être identifiées sur chaque portion de signal étudiée, à l'aide des dimensions perceptives. Le tableau 5.12 regroupe les paramètres perceptifs et/ou acoustiques et/ou mécaniques associés aux dimensions, pour les différentes portions de signal.

Portions des sons	Dimensions	Paramètres		
		Perceptifs	Acoustiques	Mécaniques
Transitoire	1	Hauteur tonale	?	?
	2	?	?	?
Intermédiaire	1	Hauteur tonale	F_{max}	Épaisseur
	2	Fluctuations de niveau	Fréquence de modulation	Amortissement et géométrie
	3	Décroissance	?	Amortissement et épaisseur
Amortie	1	Sonie	Sonie	Amortissement
	2	Bruit de fond	×	×
	3	Hauteur tonale	F_{max}	Épaisseur
Entière	1	Hauteur tonale	F_{max}	Épaisseur
	2	Décroissance	?	Amortissement et épaisseur

TAB. 5.12 – Bilan des paramètres perceptifs, acoustiques et mécaniques associés à chaque dimension. Les points d'interrogation signifient que les paramètres n'ont pas été identifiés. Les croix signifient qu'il n'y a pas de paramètre associé.

Le but de l'étude était de trouver les valeurs des paramètres mécaniques et géométriques qui minimisent les dissemblances perceptives entre le son synthétisé et le son enregistré. À partir de la position sur chaque espace, du son enregistré, le numéro 17,

nous pouvons identifier les valeurs approchées de l'amortissement, de l'épaisseur et de la géométrie à choisir afin de synthétiser le son le plus semblable possible à celui enregistré.

Pour la partie transitoire. Sur cette portion de signal, aucune corrélation n'a été établie entre les dimensions et des paramètres acoustiques ou mécaniques si bien que nous ne pouvons pas en déduire des valeurs équivalentes des paramètres pour calculer le son de synthèse le plus proche du son enregistré.

Pour la partie intermédiaire. La hauteur tonale du son enregistré est très proche de celle des sons 9 à 16 (figure 5.22, dimension 1). Cette dimension n'a pas été corrélée à un paramètre mécanique. Cependant, sur cette dimension, nous pouvons supposer que l'épaisseur correspondant au son 17 est équivalente à celle des sons 9 à 16 variant de 1,86 et 1,92 mm. Par conséquent, la valeur d'épaisseur équivalente du son 17 pourrait être comprise entre ces deux valeurs.

Les fluctuations de niveau du son enregistré sont perçues de façon équivalente à celles des sons 7 à 12 (figure 5.22, dimension 2) dont la fréquence de modulation est de 3 Hz environ. Les longueurs et largeurs équivalentes sont respectivement $L_y=89,275$ cm et $L_x=75,2$ cm.

Le paramètre perceptif correspondant à la dernière dimension de l'espace perceptif de la portion intermédiaire n'a pas été clairement identifiée. Cependant, cette dimension est liée à la variation de l'amortissement et de l'épaisseur (voir figure 5.26). A partir de la dimension 1 (figure 5.22), nous avons déduit une valeur d'épaisseur équivalente située entre 1,86 et 1,92 mm. Par conséquent, si l'on se réfère à la figure 5.22, puis aux régressions linéaires correspondant à $h=1,86$ et $h=1,92$ à la figure 5.26, on constate que la valeur d'amortissement du son 17 est supérieure à celle des sons 9 et 13 qui est égale à $1,8 \cdot 10^{-3}$.

Pour la partie amortie. La sonie du son enregistrée est la même que celle des sons 1, 7, 11 et 15 (figure 5.23, dimension 1) correspondant à des valeurs d'amortissement égales à 10^{-3} .

La hauteur tonale du son enregistré est équivalente à celle des sons 9 à 12 (figure 5.23, dimension 3) qui correspondent à des valeurs d'épaisseur égales à 1,86 mm.

Pour la totalité du signal. La hauteur tonale du son enregistré est équivalente à celle des sons de synthèse 9 à 12 (figure 5.24, dimension 1). Par conséquent, l'épaisseur équivalente est de 1,86 mm, de même que dans la portion amortie.

Le paramètre perceptif correspondant à la seconde dimension de l'espace perceptif du signal entier n'a pas été clairement identifiée, comme pour la troisième dimension de la portion intermédiaire. Cependant, cette dimension est liée à la variation de l'amortissement et de l'épaisseur (voir figure 5.32). A partir de la dimension 1 (figure 5.24), nous avons déduit une valeur d'épaisseur équivalente égale à 1,86 mm. Par consé-

quent, si l'on se réfère à la figure 5.24, puis aux régressions linéaires correspondant à $h=1,86$ à la figure 5.32, on constate que la valeur d'amortissement du son 17 est supérieure à celle du son 9 qui est égale à $1,8 \cdot 10^{-3}$.

Le tableau 5.13 présente un récapitulatif des valeurs d'amortissement, d'épaisseur, de longueur et de largeur équivalentes à prendre en compte.

Paramètres de la plaque	Partie transitoire	Partie intermédiaire	Partie amortie	Signal entier
Epaisseur (mm)	×	$1,86 < h < 1,92$	1,86	1,86
Amortissement (10^{-3})	×	$\eta > 1,8$	1	$\eta > 1,8$
Longueurs et largeurs	×	$L_y = 89,275 \text{ cm}$ $L_x = 75,2 \text{ cm}$	×	×

TAB. 5.13 – Paramètres de la plaque correspondant aux ressemblances perceptives et identifiées sur chaque portion de signal testée. Les croix signifient que les valeurs équivalentes n'ont pas été mises en évidence dans certains cas.

5.7.3 Conclusions

Deux expériences ont été menées. La première était un test de dissemblances entre un son enregistré et ce même son filtré passe-bas. Les fréquences de coupure étaient la variable du test. Les résultats ont permis de déterminer le domaine de fréquence à prendre en compte pour la modélisation de façon à ce que le son de synthèse soit le plus semblable à celui enregistré tout en ayant un temps de calcul le plus court possible. Le domaine à reproduire s'étend jusqu'à 8000 Hz. Le critère de dissemblances était lié à la présence ou pas de composantes spectrales peu intenses situées entre 1500 et 8000 Hz. En effet, le filtrage de ces composantes engendrait une suppression de la brillance du signal.

La seconde expérience avait pour but d'identifier les valeurs d'amortissement, d'épaisseur et de dimensions à prendre en compte dans la synthèse afin que le son calculé soit le plus semblable au son enregistré. Un test de dissemblances a été entrepris entre un son enregistré et N autres sons de synthèse qui étaient susceptibles d'être semblables à celui-ci. Puis, nous avons effectué une analyse multidimensionnelle des sons. Nous en avons déduit des valeurs d'amortissement différentes suivant les portions étudiées. Ces valeurs bien qu'elles soient différentes sont raisonnablement proches. Cependant, une seule valeur d'amortissement peut être utilisée pour le modèle. Par conséquent, le modèle d'amortissement n'est pas valide pour ce son là d'un point de vue perceptif. D'autre part, si nous avons à choisir une valeur d'amortissement sur la totalité du signal, il est plus important de choisir la valeur correspondant au meilleur recalage sur la partie intermédiaire plutôt que sur la partie amortie.

Les valeurs des longueurs et largeurs équivalentes ont également été mises en évidence sur la partie intermédiaire des signaux. Quant à la valeur d'épaisseur équivalente, elle a été identifiée sur les portions intermédiaire, amortie puis sur le signal testé entièrement. Elle est proche de 1,86 mm ce qui correspond approximativement à une concordance des fréquences de résonance de plus forte énergie.

5.8 Conclusion générale et perspectives

Dans un premier temps, les valeurs des paramètres à introduire dans le modèle ont été définies de façon à recaler les signaux synthétisés sur ceux enregistrés. Des valeurs d'amortissement et d'épaisseur ont ainsi été désignées. La valeur d'amortissement, égale à 10^{-3} , a été choisie en recalant les décroissances de niveau du son synthétisé sur celles du son enregistré dans les quatre premières bandes de Bark, sur la partie amortie. L'épaisseur équivalente, égale à 1,86 ou 1,92 mm suivant les cas, a été choisie de façon à faire concorder la fréquence du son de synthèse ayant le plus d'énergie sur celle du son enregistré.

Dans un second temps, les signaux ont été synthétisés avec ces valeurs. Une comparaison objective a été établie entre les sons enregistrés et synthétisés tant d'un point de vue spectral que temporel. Il en résulte que dans certains cas ces valeurs définies ne minimisaient pas forcément les différences objectives, notamment pour l'amortissement. En effet, pour une valeur d'amortissement fixée, les enveloppes temporelles des signaux synthétisés n'étaient pas suffisamment amorties sur les portions intermédiaires et/ou amorties par rapport aux enveloppes des sons enregistrés.

Dans un dernier temps, il s'agissait de déterminer les valeurs des paramètres à utiliser pour la synthèse de façon à minimiser les dissemblances perceptives. Des tests entre un son enregistré (le son E-3-2) et N sons synthétisés avec différentes valeurs d'épaisseur, d'amortissement et de géométries, ont été menés sur les différentes portions de signal (transitoire, intermédiaire, amortie et sur la totalité).

Les dimensions perceptives ont dans l'ensemble été identifiées, excepté sur la portion transitoire.

La valeur d'épaisseur que nous avons définie au recalage correspond au minimum perceptif de hauteur tonale entre le son enregistré et le son synthétisé sur les portions intermédiaire, amortie et sur tout le signal. Ce résultat rejoint celui que nous avons trouvé au chapitre 4, sur la hauteur tonale des sons de plaque. En effet, la hauteur est essentiellement liée à la fréquence ayant le plus d'énergie dans le signal qui elle-même est liée à l'épaisseur de la plaque.

La valeur d'amortissement, définie également au recalage correspond à un minimum perceptif entre les sons enregistré et synthétisé sur la partie amortie. Cependant, cette valeur ne correspond pas au meilleur recalage perceptif sur la portion intermédiaire et sur tout le signal. Elle est insuffisante pour la paire étudiée P-3-2. Ces divergences étaient également observées sur les enveloppes temporelles. En effet, les enveloppes temporelles concordaient sur la partie amortie mais pas sur la partie intermédiaire. Les différences objectives observées sur les enveloppes temporelles sont représentatives de celles perçues. Les limites du modèle d'amortissement sont prouvées car, dans le cas du son S-3-2, il aurait fallu introduire deux valeurs distinctes d'amortissement. D'autre part, des valeurs de longueur et de largeur minimisant les différences perceptibles de fluctuation de niveau ont été identifiées. Ces valeurs correspondent à une concordance des fréquences de modulation des sons enregistré et synthétisé.

D'autres tests perceptifs de dissemblance pourraient être menés sur les autres sons

enregistrés afin de confirmer les hypothèses sur le recalage de l'épaisseur. D'autre part, il serait intéressant de tester un autre modèle d'amortissement dont une valeur pourrait minimiser les dissemblances objectives et perceptives sur toute la durée du signal.

Conclusion

Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur le cas particulier d'une plaque soumise à une force mécanique (une impulsion de durée finie), menant ainsi à l'étude de sons transitoires.

Ces études ont permis d'établir des relations entre les paramètres mécaniques et géométriques des plaques, les paramètres acoustiques/physiques des sons et les attributs perceptifs utilisés par des auditeurs lors des tests psychoacoustiques.

Les problèmes abordés nous ont permis d'apporter des réponses à trois types d'interrogations :

1. Quel est l'effet perceptif de la variation de l'amortissement de la structure, de la durée et du lieu d'impact en termes de similarité et d'agrément ?

Des tests d'agrément puis de similarité, permettant d'obtenir un espace multidimensionnel des sons, ont été entrepris.

La variation d'amortissement de la structure produit essentiellement une modification de la brillance des sons qui résulte du produit du centre de gravité spectral par la durée des sons. Deux groupes de sujets se sont distingués selon les valeurs d'amortissement. Le premier groupe, constitué essentiellement d'acousticiens, a préféré les sons les moins amortis jugeant que les sons avaient un intérêt musical. Leurs estimations étaient corrélées au "taux de décroissance" des signaux (défini au paragraphe 3.5.1.1). Le second groupe, composé essentiellement de mécaniciens, a préféré les sons les plus amortis jugeant qu'ils étaient moins gênants. Leurs jugements étaient corrélés au centre de gravité spectral. La variation du lieu ainsi que de la durée d'impact influence la tonalité des signaux sur la partie résonante et l'acuité sur la partie transitoire. Les sons correspondant à des durées d'impact élevées et à des excitations au centre de la plaque ont été jugés plus agréables par l'ensemble des sujets.

2. Peut-on simplifier la modélisation d'une plaque d'épaisseur variable par celle d'une plaque d'épaisseur constante en se basant sur des critères perceptifs ?

Quatre géométries de plaques d'épaisseur variable ont été étudiées. Des tests de dissemblances ont été réalisés entre un son de chaque plaque d'épaisseur variable et N sons de plaques d'épaisseur constante. Lorsque le timbre des sons de plaques homogènes est similaire à celui du son de plaque d'épaisseur variable, c'est-à-dire lorsque les enveloppes spectrales sont similaires, alors il existe une plaque d'épaisseur constante équivalente. Le son de plaque équivalente a une hauteur tonale très proche de celle du son de plaque d'épaisseur variable, ce qui se traduit globalement par une concordance des fréquences ayant le plus d'énergie.

3. Quels sont les paramètres et les valeurs de ces paramètres à introduire dans la modélisation de façon à minimiser les dissemblances objectives et perceptives entre sons enregistrés et sons synthétisés ?

La synthèse de sons de plaque nécessite généralement, à cause notamment des incertitudes entrant en compte dans les mesures, des recalages des paramètres d'entrée. Pour notre étude, nous avons choisi de recaler trois paramètres : l'amortissement du matériau, l'épaisseur et les dimensions (longueurs et largeurs) de la plaque. Des tests de dissemblance ont été réalisés entre un son enregistré et N sons synthétisés avec différentes valeurs pour les paramètres. Les tests portaient sur la totalité des signaux ainsi que sur trois portions sur lesquelles les signaux ont été décomposés : transitoire, intermédiaire et amortie.

Une analyse multidimensionnelle des sons a mené aux résultats suivants :

- Le meilleur recalage de l'épaisseur correspond à une similarité de la hauteur tonale des sons enregistrés et synthétisés. D'un point de vue objectif, ceci correspond à une concordance des composantes spectrales ayant le plus d'énergie pour le son de synthèse et pour le son enregistré.
- Le recalage des longueur et largeur correspond à une similarité des fluctuations de niveau qui s'explique par une concordance des fréquences de modulation des sons.
- Pour l'amortissement, différentes valeurs équivalentes ont été identifiées sur les portions intermédiaires et amorties. Sur la portion amortie, le meilleur recalage de l'amortissement correspond à une similarité entre la sonie du son enregistré et celle du son synthétisé. Sur la portion intermédiaire et sur le signal entier, les paramètres perceptif et acoustique correspondant au meilleur recalage d'amortissement n'ont pas été clairement identifiés. Pour la modélisation, une seule valeur peut être introduite. Par conséquent, le modèle d'amortissement est trop approximatif ; il en faudrait un avec une dépendance plus fine en fréquence.

Une partie de ces études a été publiée dans les références [67] [68] [69] [70] et [71].

Les perspectives sur la première étude portant sur l'effet perceptif de la variation des paramètres de la plaque et de l'excitation sont les moins nombreuses car le sujet a largement été abordé par d'autres auteurs. Cependant, il serait intéressant de tester l'effet de la précision des paramètres de calcul. Une précision plus importante sur le calcul et les approximations des intégrales serait-elle perceptible ?

Le problème de la perception des sons rayonnés par des coques pourrait être exploré. En effet, il serait intéressant de mener une étude analogue à celle présentée au chapitre 4 où l'étude ne porterait plus sur une plaque d'épaisseur variable mais sur une coque. L'intérêt serait de simplifier sa modélisation qui reste très complexe.

En ce qui concerne la comparaison des sons enregistrés et synthétisés les perspectives sont nombreuses. Dans un premier temps, les expériences de dissemblance entre un son enregistré et N sons de synthèse pourraient être renouvelées en utilisant des sons rayonnés par d'autres plaques (matériau, dimensions) et soumises à d'autres excitations (maillet constitué de différents matériaux). A plus long terme, il serait intéressant de valider le modèle utilisé en se basant sur des critères perceptifs. Dans un premier temps, d'un point de vue vibroacoustique, il s'agirait de reprendre le mo-

dèle numérique afin de l'optimiser et d'effectuer une étude vibratoire approfondie. Une étude psychoacoustique complèterait l'étude vibroacoustique en testant des sons rayonnés par différentes plaques soumises à différentes excitations et en différents points de l'espace.

D'un point de vue vibroacoustique, cette approche psychomécanique permet de simplifier des modélisations complexes. Par exemple, il est possible de simplifier la modélisation de l'épaisseur des plaques tout en gardant la même perception du son rayonné, ce qui fait réaliser une économie du temps de calcul. Une autre illustration est celle présentée au paragraphe 5.7.1, dans lequel nous avons montré que le niveau d'une composante spectrale située autour de 300 Hz masquait le niveau des composantes situées entre 300 et 1000 Hz. Dans ce cas, il serait intéressant d'apporter une précision fine sur le calcul de la composante masquante et de négliger en revanche la précision du calcul des fréquences correspondant aux composantes supérieures, masquées. Les effets de masquage sont à prendre en compte pour tous ceux qui synthétisent des sons ou modélisent le comportement vibratoire d'une structure rayonnant un bruit. Dans ce dernier cas, les modes rayonnant les fréquences masquantes sont à modéliser avec davantage de précision.

D'un point de vue psychoacoustique, la psychomécanique permet d'aborder des thèmes plus complexes de la perception auditive. Par exemple, nous avons été confronté au problème de la hauteur tonale des sons transitoires, complexes et inharmoniques qui n'est pas résolu à ce jour et que nous n'avons abordé que succinctement.

Les études psychomécaniques portent désormais sur des systèmes plus complexes. La complexité porte sur l'excitation, dans le cas d'une étude sur le bruit de roulement d'une balle sur une plaque. Cette étude présente des problèmes plus complexes de modélisation [72] mais aussi de perception puisqu'il s'agit d'étudier des sons rugueux. La complexité est aussi celle de la géométrie, par exemple dans le cas de l'étude d'une plaque vibrante couplée à une cavité, afin de mieux comprendre la perception sonore à l'intérieur d'une voiture de TGV [73]. Une étude de ce système permet de mieux comprendre le comportement vibroacoustique d'une voiture de TGV et la perception sonore à l'intérieur, en se basant sur un modèle simplifié. Les travaux psychomécaniques présentent ainsi des intérêts industriels grandissant car l'utilisation d'indices purement acoustiques ne permet pas d'analyser la perception des sons, surtout lorsqu'il s'agit d'en étudier la qualité.

La psychomécanique peut s'appliquer à l'acoustique musicale pour améliorer la conception des instruments de musique telles que des guitares. On peut modifier les caractéristiques mécaniques du matériau à partir duquel l'instrument est conçu tout en préservant la qualité du son rayonné. Une étude portant sur des éprouvettes en bois (barres) avait justement pour objet d'expliquer la qualité acoustique des essences de bois sur la base de leur propriétés mécaniques [74]. Des tests de classification des sons (correspondant à différentes essences de bois) par ordre d'intérêt musical pour la fabrication d'un xylophone ont permis de déterminer les meilleurs essences.

Des études de plus en plus nombreuses portent sur les aspects multisensoriels de la perception. Au schéma 1.1 de la page 32 décrivant les liens entre les paramètres mécaniques, acoustiques et perceptifs, nous pourrions par exemple ajouter le paramètre visuel. Dans le multisensoriel, le couplage peut être en effet auditif et visuel. Par exemple, la couleur de photos (de l'événement sonore) visionnées pendant l'écoute d'un même son modifie la perception du niveau sonore [75]. Une autre étude montre que des jugements auditifs de sons provenant d'un environnement dans lequel se trouve une barrière, suivent l'échelle de l'agrément visuel de la barrière. La couleur d'une barrière ou la végétation située autour modifie la perception sonore [76]. Les études multisensorielles peuvent porter également sur le couplage vibratoire et auditif. Une étude a montré qu'il n'y avait pas d'interaction entre signaux vibratoires et acoustiques pour le jugement du confort acoustique à l'intérieur d'une voiture [77]. La psychomécanique pourrait ainsi s'intégrer à des études multisensorielles.

Bibliographie

- [1] N. I. 362, *Acoustics—Measurements of noise emitted by accelerating road vehicles—Engineering method*. 1998.
- [2] G. Canévet, G. Mangiante, « Psychoacoustic assessment of active noise control », in *ACTIVE*, (Williamsburg), Septembre 2005.
- [3] C. Powell, B. Sullivan, « Subjective response to propeller airplane interior sounds modified by hypothetical active noise control systems », *Noise Control Engineering Journal*, **49**, pp. 125–136, 2001.
- [4] M. Santacrose, *Quelques aspects de la psychomécanique de Guillaume*. http://marg.lng6.free.fr/documents/doc0191_santacrose_m/linguistique_guillaume.pdf, 1999.
- [5] S. McAdams, « The psychomechanics of real and simulated sound sources », *J. Acoust. Soc. Am.*, **107**, p. 2792, 2000.
- [6] D. Freed, « Auditory correlates of perceived mallet hardness for a set of recorded percussive sound events », *J. Acoust. Soc. Am.*, **87**, pp. 311–322, 1990.
- [7] S. McAdams, A. Chaigne, V. Roussarie, « The psychomechanics of simulated sound sources : Material properties of impacted bars », *J. Acoust. Soc. Am.*, **115**(3), pp. 1306–1320, 2004.
- [8] V. Roussarie, *Analyse perceptive de structures vibrantes*. Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, 1999.
- [9] S. Meunier, D. Habault, G. Canévet, « Auditory evaluation of sound signals radiated by a vibrating surface », *J. Sound. Vib.*, **247**, pp. 897–915, 2001.
- [10] J. Faure, C. Marquis-Favre, « Perceptual assessment of the influence of structural parameters for radiating plate », *Acta Acustica*, **91**, pp. 77–90, 2005.
- [11] J. Faure, *Influence de paramètres structuraux d’une plaque rayonnante sur la perception sonore*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, INSA de Lyon, 2003.
- [12] A. Trollé, C. Marquis-Favre, J. Faure, « Effects of the window mounting conditions on the auditory perception of transmitted environmental noises », in *4^{ième} Forum Acusticum*, (Budapest), Août 2005.
- [13] N. Hamzaoui, C. Sandier, E. Parizet, P. Wetta, C. Besseyrias, « Subjective assessments of the acoustic radiation from steel structures : some effects of a few parametric variations », in *3^{ième} EAA*, (Séville), Sept. 2002.

- [14] E. Guibert, « Rayonnement acoustique d'un système plaque/cavité : validation perceptive du degré de modélisation », Rapport de DEA d'Acoustique, Marseille, 2004.
- [15] R. Lutfi, E. Oh, « Auditory discrimination of material changes in a struck-clamped bar », *J. Acoust. Soc. Am.*, **102**, pp. 3647–3656, 1997.
- [16] B. Giordano, « Material recovery from real impact sounds in physically-based sound spaces and psychophysical scales, sounding objects group report », 2003.
- [17] S. Lakatos, S. McAdams, R. Caussé, « The representation of auditory source characteristics : simple geometric form », *Perception and Psychophysics*, **59**, pp. 1180–1190, 1997.
- [18] O. Houix, *Catégorisation auditive de sources sonores*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 2003.
- [19] R. Lutfi, « Auditory detection of hollowness », *J. Acoust. Soc. Am.*, **110**, pp. 1110–1119, 2001.
- [20] A. Kunkler-Peck, M. Turvey, « Hearing shape », *Journal of Experimental Psychology*, **26**(1), pp. 279–294, 2000.
- [21] R. Lutfi, E. Oh, E. Storm, M. Alexander, « Classification and identification of recorded and synthesized impact sounds by practiced listeners, musicians, and nonmusicians », *J. Acoust. Soc. Am.*, **118**, pp. 393–404, 2005.
- [22] C. Stoelinga, B. Peeters, I. Lopez, « The bouncing of balls : Influences of spectral and temporal variations on perception », in *7^{ième} Forum Acusticum*, (Strasbourg), Mars 2004.
- [23] M. Houben, A. Kohlrausch, D. Hermes, « The contribution of spectral and temporal information to the auditory perception of the size and speed of rolling balls », *Acta Acustica*, **85**, pp. 650–656, 1999.
- [24] M. Grassi, « Perception of object size », Physically-Based Sound Spaces and Psychophysical Scales Sounding Objects Group report, 2003.
- [25] M. Botte, G. Canévet, L. Demany, C. Sorin, *Psychoacoustique et perception auditive*. EM inter, série audition, INSERM/SFA/CNET, 1989.
- [26] I. Boulet, *La sonie des sons impulsionnels : perception, mesures et modèles*. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, Marseille, 2005.
- [27] E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics : Facts and models*. Berlin : Springer-Verlag, 1999.
- [28] E. Paulus, E. Zwicker, « Programme zur automatischen bestimmung der lautheit aus terzpegeln oder frequenzgruppenpegeln », *Acta Acustica*, **27**, pp. 253–364, 1972.
- [29] E. Zwicker, H. Fastl, C. Dallmayr, « Basic-program for calculating the loudness of sounds from their 1/3-oct. band spectra according to iso 532b », *Acta Acustica*, **55**, pp. 63–67, 1984.
- [30] B. Moore, G. B.R., « A revision of zwicker's loudness model », *Acta Acustica*, **82**, pp. 335–345, 1996.

- [31] B. Glasberg, B. Moore, « A model of loudness applicable to time-varying sounds », *J. Acoust. Soc. Am.*, **50**(5), pp. 331–342, 2002.
- [32] E. Zwicker, « Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds », *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**(3), pp. 675–682, 1977.
- [33] E. Zwicker, R. Feldtkeller, *L'oreille récepteur de l'information*. Paris : Masson, 1981.
- [34] AFNOR, *Recueil des normes françaises de l'acoustique, Tome 1*. NFS 30-107, 1977.
- [35] R. Shepard, *The psychology of Music : Structural representation of musical pitch*. 1982.
- [36] F. Grandori, « Theoretical and experimental analysis of a central optimal processor for pitch of multicomponent inharmonic tones », *Hearing Research*, **15**, pp. 151–158, 1984.
- [37] E. Terhardt, G. Stoll, M. Seewann, « Pitch of complex signals according to virtual pitch theory : Tests, examples and predictions », *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, pp. 671–678, 1982.
- [38] E. Terhardt, G. Stoll, M. Seewann, « Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals », *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, pp. 679–688, 1982.
- [39] A. De Cheveigné, K. H., « Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music », *J. Acoust. Soc. Am.*, **111**(4), pp. 1917–1930, 2002.
- [40] ANSI, *American National Standards Institute. USA Standard Acoustic Terminology, S1*. 1960.
- [41] J. Marozeau, *L'effet de la fréquence fondamentale sur le timbre*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Paris, 2004.
- [42] J. Grey, « Multidimensional perceptual scaling of musical timbres », *J. Acoust. Soc. Am.*, **61**, pp. 1270–1277, 1977.
- [43] J. Krimphof, S. McAdams, S. Winsberg, « Caractérisation du timbre des sons complexes. ii. analyses acoustiques et quantifications psychophysiques », in *Actes du 3^{ième} Congrès Français d'Acoustique, J. Phys*, vol. 4, pp. 625–628, 1994.
- [44] A. Caclin, S. McAdams, B. Smith, S. Winsberg, « Acoustic correlates of timbre space dimensions : a confirmatory study using synthetic tones », *J. Acoust. Soc. Am.*, **118**, pp. 471–482, 2005.
- [45] H. Fastl, « The psychoacoustics of sound quality evaluation », *Acta Acustica*, **83**, pp. 754–764, 1997.
- [46] A. Chaigne, C. Lambourg, « Time-domain simulation of damped impacted plates. i. theory and experiments », *J. Acoust. Soc. Am.*, **109**(4), pp. 1433–1447, 2001.
- [47] C. Lambourg, A. Chaigne, D. Matignon, « Time-domain simulation of damped impacted plates. i. numerical model and results », *J. Acoust. Soc. Am.*, **109**(4), pp. 1422–1432, 2001.

- [48] D. Habault, P. Filippi, « Light fluid approximation for sound radiation and diffraction by thin elastic plates », *J. Sound. Vib.*, **213**, pp. 333–374, 1998.
- [49] D. Habault, P. Filippi, « On the transient response of a fluid-loaded structure represented by a series of resonance modes », *J. Sound. Vib.*, **259**(5), pp. 1269–1275, 2003.
- [50] P. Filippi, D. Habault, J.-P. Lefebvre, A. Bergasoli, *Acoustics*. Academic Press, 1999.
- [51] D. Habault, P. Filippi, « A numerical method for the computation of the resonance frequencies and modes of a fluid-loaded plate : application to the transient response of the system », *J. Sound. Vib.*, **270**, pp. 207–231, 2004.
- [52] A. Leissa, *Vibration of plates*. Acoustical Society of America, 1993.
- [53] S. Stevens, *Psychophysics*. John Wiley, 1975.
- [54] M. Lavandier, *Différences entre enceintes acoustiques : une évaluation physique et perceptive*. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, Marseille, 2005.
- [55] G. Lemaître, P. Susini, S. Winsberg, S. McAdams, « Perception of the timbre of a car horns », in 3^{ième} EAA, (Séville), Sept. 2002.
- [56] P. Susini, S. McAdams, S. Winsberg, « A multidimensional technique for sound quality assessment », *Acta Acustica*, **85**, pp. 650–656, 1999.
- [57] J. Kruskal, « Nonmetric multidimensional scaling : a numerical method », *Psychometrika*, **29**(2), pp. 115–129, 1964.
- [58] J. Kruskal, « Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a non-metric hypothesis », *Psychometrika*, **29**(1), pp. 1–27, 1964.
- [59] J. Risset, D. Wessel, *Exploration of timbre by analysis and synthesis in Psychology of music*. New York Academic Press : Academic Press, 1999.
- [60] J. Schouten, R. Ritsma, B. Cardozo, « Pitch of residue », *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**(8), pp. 1418–1424, 1962.
- [61] G. Moore, B. Moore, « Perception of the low pitch of frequency-shifted complexes », *J. Acoust. Soc. Am.*, **113**(2), pp. 977–985, 2003.
- [62] D. Nelson, M. Stanton, R. Freyman, « A general equation describing frequency discrimination as a function of frequency and sensation level », *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**(6), pp. 2117–2123, 1962.
- [63] C. Wier, W. Jesteadt, D. Green, « Frequency discrimination as a function of frequency and sensation level », *J. Acoust. Soc. Am.*, **61**(1), pp. 178–183, 1977.
- [64] A. Sek, B. Moore, « Frequency discrimination as a function of frequency, measured in several ways », *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**, pp. 2479–2486, 1995.
- [65] D. Irvine, R. Martin, K. Smith, R. Smith, « Specificity of perceptual learning in a frequency discrimination task », *J. Acoust. Soc. Am.*, **108**, pp. 2964–2968, 2000.
- [66] P. Troccaz, R. Woodcock, F. Laville, « Acoustic radiation due to the inelastic impact of a sphere on a rectangular plate », *J. Acoust. Soc. Am.*, **108**(5), pp. 2197–2202, 2000.

- [67] F. Demirdjian, D. Habault, S. Meunier, S. Canévet, « Etude perceptive du rayonnement acoustique de structures », in *17^{ième} Congrès Français de Mécanique*, (Troyes), Août 2005.
- [68] G. Canévet, D. Habault, S. Meunier, F. Demirdjian, « Auditory perception of sounds radiated by a fluid-loaded vibrating plate excited by a transient point force », *Acta Acustica*, **90**, pp. 181–193, 2004.
- [69] F. Demirdjian, D. Habault, S. Meunier, G. Canévet, « Can we hear the complexity of vibrating plates ? », in *7^{ième} Congrès Français d'Acoustique*, (Strasbourg), Mars 2004.
- [70] F. Demirdjian, S. Meunier, D. Habault, G. Canévet, « A comparative study of recorded and computed sounds radiated by vibrating plates », in *4^{ième} Forum Acusticum*, (Budapest), Août 2005.
- [71] D. Habault, F. Demirdjian, S. Meunier, G. Canévet, « Sound radiation of a plate excited by an impact. physical and perceptual comparisons between numerical and experimental results », *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**(4), p. 2456, 2005.
- [72] C. Stoelonga, A. Chaigne, « Simulations and experiments regarding rolling objects », in *Acte du Forum Acusticum*, (Budapest), août 2005. ISBN 963 8241 68 3.
- [73] E. Guibert, D. Habault, F. Poisson, P.-E. Gautier, « Psychomécanique appliquée à un système plaque/cavité », *Journée Renault-SFA-SNCF du 30 novembre 2005 "Méthodes expérimentales en acoustique des transports, nouveaux développements, corrélations calculs-essais "*, pp. 99–107, 2005.
- [74] B. Metzger, « Etude acoustique des bois tropicaux. application aux instruments de musique percussifs », Rapport de DEA d'Acoustique, Marseille, 2003.
- [75] C. Patsouras, T. Filippou, H. Fastl, « Influences of color on the loudness judgement », in *3^{ième} Forum Acusticum*, (Séville), 2002.
- [76] S. Viollon, C. Lavandier, « Environnemental approach of the perception of noise transmitted through barriers », in *Internoise*, (Dearborn), Août 2002.
- [77] V. Roussarie, M. Sauvage, E. Gressant, E. Diaz, « Evaluation of comfort for vibroacoustic transient excitation », in *Acte du Forum Acusticum*, (Budapest), août 2005. ISBN 963 8241 68 3.
- [78] W. Jesteadt, « An adaptative procedure for subjective judgments », *Perception and Psychophysics*, **28**, pp. 85–88, 1980.
- [79] F. Jaillet, *Représentation et traitement temps-fréquence des signaux audionumériques pour des applications de design sonore*. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, Marseille, 2005.

Annexe A

Modèle de sonie

Le schéma qui suit présente les principales étapes du modèle que nous avons utilisé pour calculer la sonie des signaux.

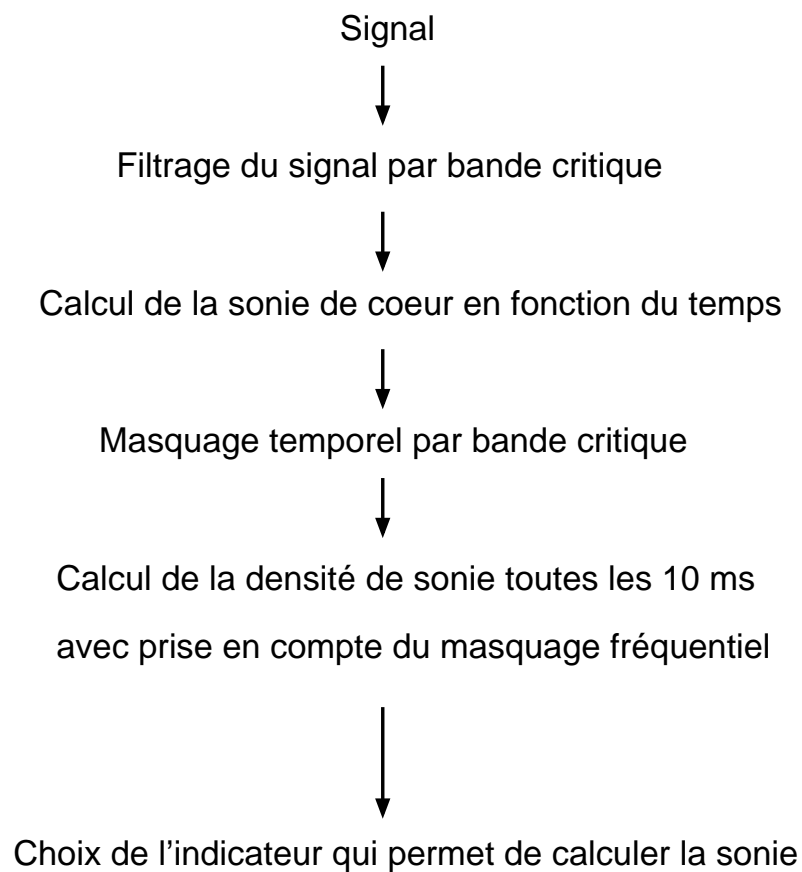


FIG. A.1 – Principales étapes du modèle de sonie de Zwicker et Fastl

Annexe B

Bandes critiques approchées

Le tableau qui suit présente les limites supérieures en fréquence des 21 bandes critiques approchées.

Numéro de la bande critique	Limite supérieure (en Hz)
1	90
2	180
3	280
4	355
5	450
6	560
7	710
8	900
9	1120
10	1400
11	1800
12	2240
13	2800
14	3550
15	4500
16	5600
17	7100
18	9000
19	11200
20	14000
21	15500

TAB. B.1 – Bandes critiques approchées

Annexe C

Matériel utilisé pour les tests psychoacoustiques

Le schéma qui suit présente le matériel utilisé pour les tests psychoacoustiques. Les sons, initialement utilisés à partir du PC ont été convertis à l'aide d'un convertisseur analogique numérique Tucker& Davis, puis restitués à l'aide d'un casque (STAX ou Senheiser suivant les expériences) à l'auditeur qui a pu évaluer ce qu'il a perçu à l'aide d'un Terminal VT 320.

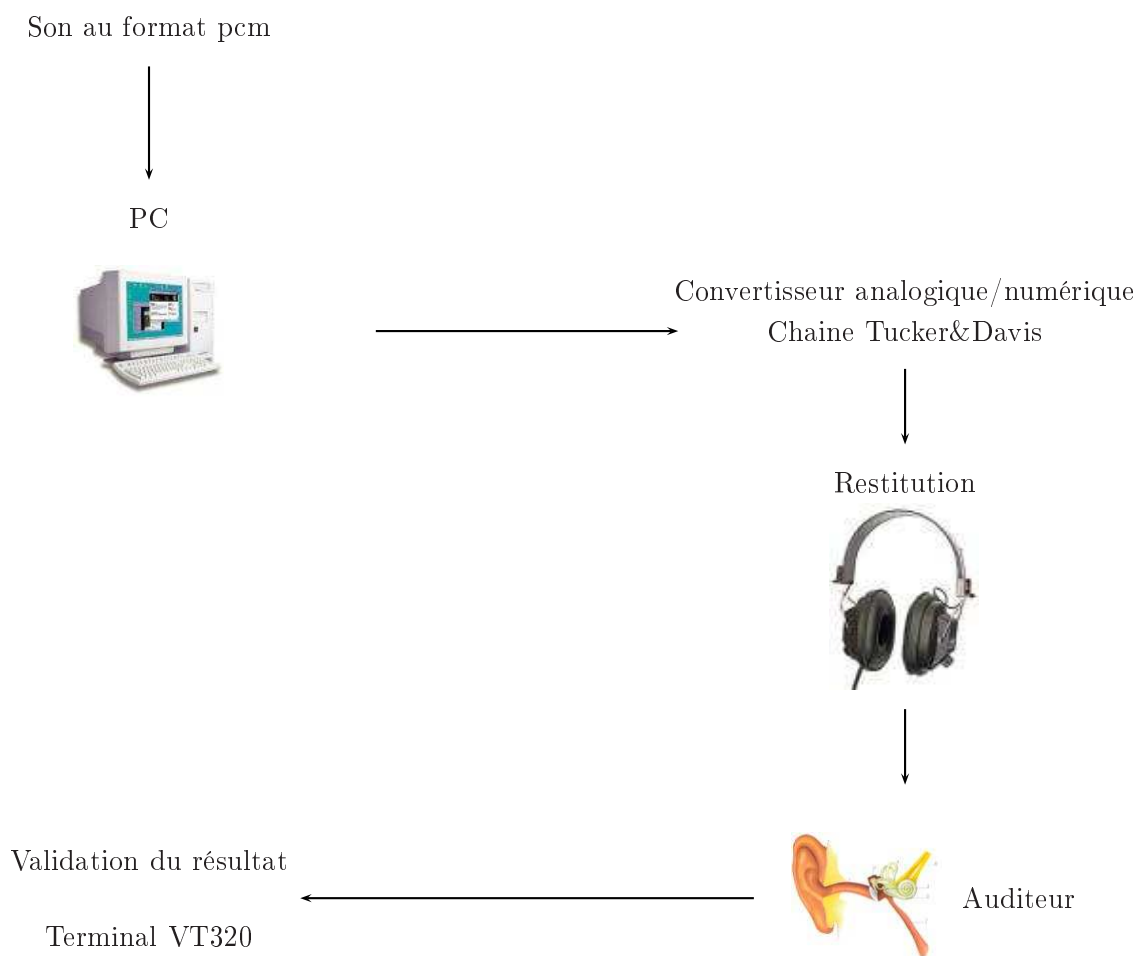


FIG. C.1 – Matériel utilisé

Annexe D

Ebouli des contraintes pour les différentes études

Les figures qui suivent présentent les contraintes en fonction des dimensions. La figure D.1 concerne l'étude sur l'effet perceptif de la variation des paramètres (chapitre 3). Les graphiques de la figure D.2 concernent l'étude sur la comparaison des sons enregistrés et synthétisés (chapitre 5). Chaque graphique correspond à une portion de signal étudiée.

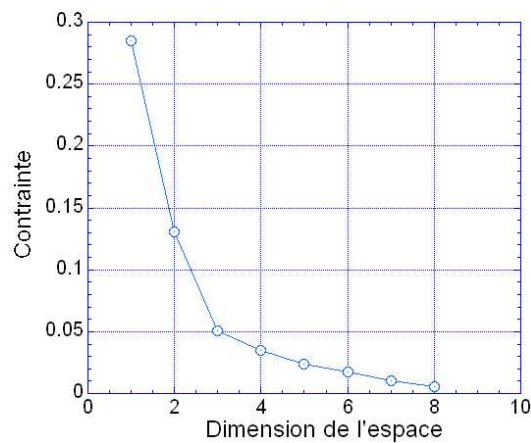


FIG. D.1 – Ebouli des contraintes (étude sur l'effet perceptif des paramètres de paramètres de l'excitation et de la structure)

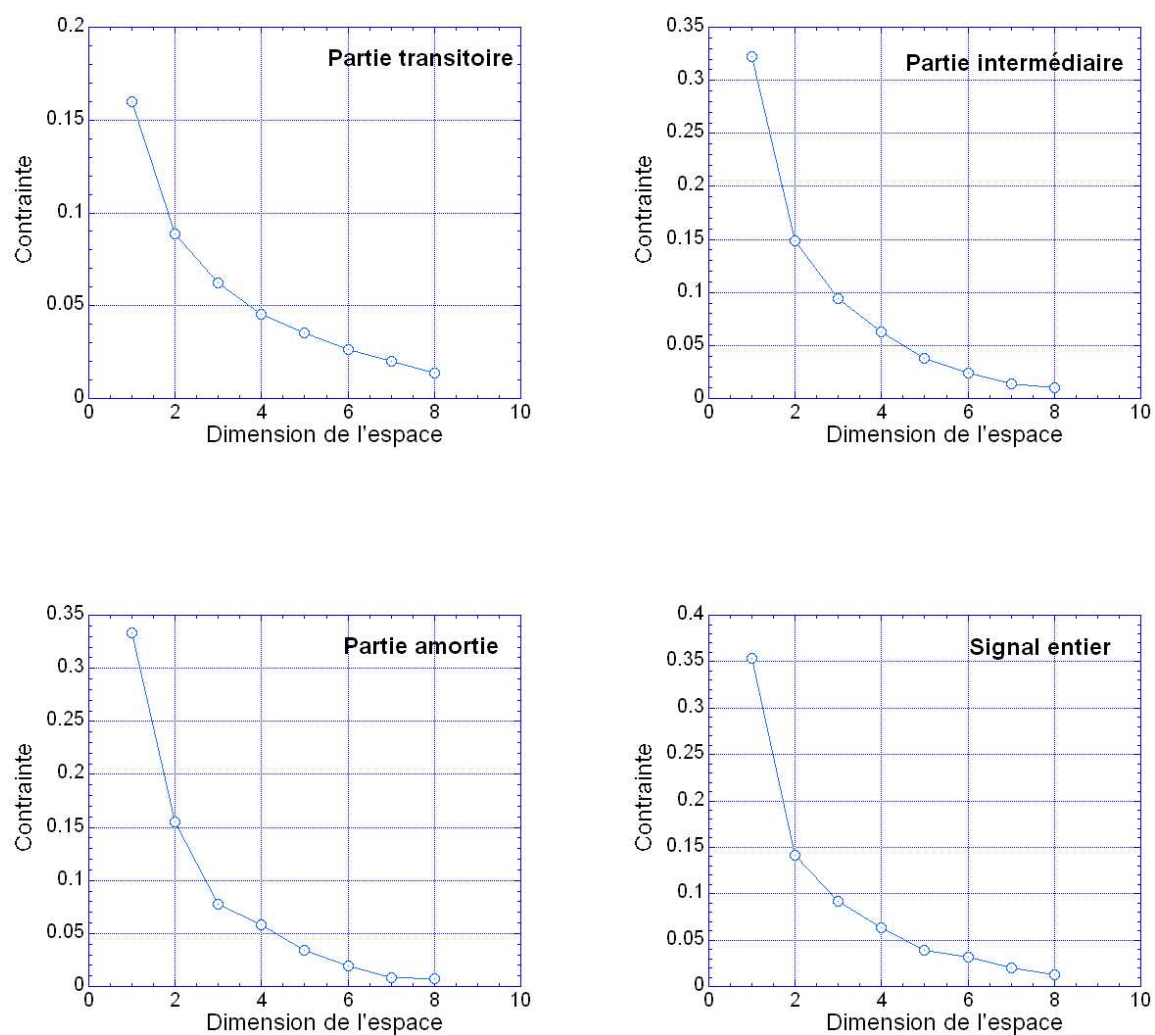


FIG. D.2 – Eboulis des contraintes sur les différentes portions de signal (étude sur la comparaison objective et perceptive de signaux enregistrés et synthétisés).

Annexe E

Appariement de hauteur tonale par la méthode adaptative

Cette annexe présente les résultats de tests d'appariement de hauteur tonale par un son pur en utilisant la méthode adaptative. Chaque test porte sur un son de plaque c'est-à-dire sur les sons B4a6-i1 et C520-i1.

E.1 Sujets

Pour le premier test, 32 sujets dont 5 femmes et 27 hommes, âgés de 19 à 62 ans, ont pris part aux tests. Pour le second test ce sont 18 sujets dont 4 femmes et 13 hommes, âgés de 19 à 62 ans, qui ont effectués les tests. Tous, membres du laboratoire ou étudiants étaient bénévoles et musiciens. Ils avaient un audiogramme normal.

E.2 Sons

Pour cette première expérience, le son B4a6-i1 a été testé et était le son de référence de l'expérience. Ce son a été comparé à un son pur de fréquence variable. Ce son pur a été amorti à l'aide d'une fonction exponentielle de façon à avoir la même décroissance temporelle que celle du son de plaque. La fréquence du son pur était la variable du test.

Pour le second test, le son de référence était le son de plaque d'épaisseur constante C520-i1. Le son pur était le même que dans l'expérience précédente.

E.3 Procédure

La procédure utilisée est la méthode adaptative à choix forcé sur deux intervalles. Cette méthode est inspirée de celle décrite par Jesteadt [78]. Une série de paires de sons constituées chacune du son pur, puis du son de plaque a été présentée à des auditeurs. Chaque sujet devait indiquer lequel des deux sons paraissait le plus aigu. Chaque paire ne pouvait être écoutée qu'une seule fois. Si le son pur paraissait plus aigu alors sa fréquence était diminuée à l'essai suivant. Si c'était le son de plaque qui paraissait plus aigu alors la fréquence du son pur était augmentée à l'essai suivant.

Il y avait "inversion" lorsque le jugement changeait d'une paire à l'autre. Quatre pas de fréquences ont été déterminés pour modifier la fréquence du son pur : 100, 15, 5 et 2 Hz. Le pas initial était donc à 100 Hz. Lorsque 3 inversions étaient atteintes le pas diminuait alors à 15 Hz. Lorsque 3 nouvelles inversions étaient atteintes le pas diminuait à 5 Hz. Lorsque 4 nouvelles inversions étaient réalisées le pas diminuait à 2 Hz. Le test était terminé lorsque 5 nouvelles inversions étaient validées soit 15 inversions depuis le début du test.

Trois tests ont été effectués. Chacun de ces tests a été réalisé à trois moments différents afin que les sujets ne soient pas influencés par leurs jugements précédents. Le son de référence (le son de plaque) était le même pour ces 3 expériences. La fréquence de départ du son pur était différente pour les trois tests. Elle avait pour valeur 100, 450 puis 800 Hz. Ces valeurs ont été choisies car :

- Le son de plaque a une concentration d'énergie entre 270 et 1000 Hz et entre 6000 et 8000 Hz. Or, la hauteur tonale a de la signification seulement jusqu'à 2000 Hz. Donc, nous nous sommes restreints à l'intervalle [25 ; 1000 Hz]
- La fréquence du premier partiel est autour de 280 Hz. Il peut donc exister une fréquence "fondamentale absente" inférieure à 270 Hz. C'est pourquoi nous avons choisi 100 Hz.
- La valeur 800 Hz a été définie car elle était proche de trois des composantes spectrales ayant le plus d'énergie.
- La valeur 450 Hz a été choisie afin d'avoir la valeur médiane entre 100 et 800 Hz. De plus cette fréquence est proche de la seconde composante spectrale des sons.

E.4 Résultats

Les résultats ont été convertis selon l'échelle musicale. De la même manière que pour la méthode d'ajustement, une note a été associée à chaque composante spectrale des sons B4a6-i1 et C520-i1, jusqu'à 2000 Hz. Puis, les fréquences appariées ont été associées ou pas à une note de chaque son.

Les résultats sont présentés sous forme d'un histogramme présentant les effectifs des notes associées selon l'échelle musicale. Les figures E.1 et E.2 présentent respectivement les histogrammes des sons B4a6-i1 et C520-i1 pour chaque fréquence de départ.

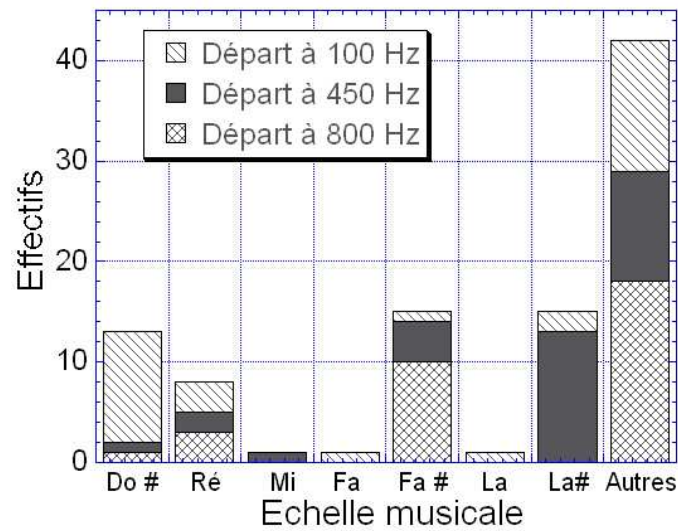


FIG. E.1 – Histogramme des effectifs des jugements d'appariement de hauteur tonale du son B4a6-i1, selon l'échelle musicale, pour la fréquence de départ égale à 100 Hz (en rayé), à 450 Hz (en grisé) et à 800 Hz (en quadrillé).

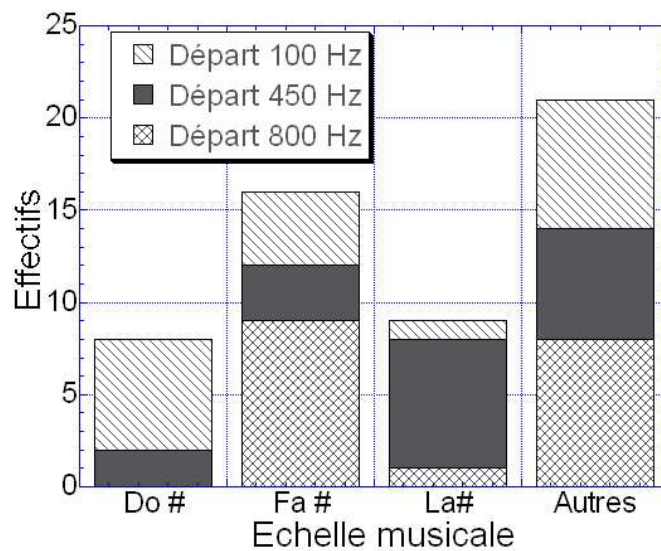


FIG. E.2 – Histogramme des effectifs des jugements d'appariement de hauteur tonale du son C520-i1, selon l'échelle musicale, pour la fréquence de départ égale à 100 Hz (en rayé), à 450 Hz (en grisé) et à 800 Hz (en quadrillé).

Si l'on regarde les effectifs cumulés (pour toutes les fréquences de départ), deux observations résultent de ces deux tests.

Tout d'abord, deux groupes de sujets ont été identifiés pour les 3 tests : ceux qui ont accordé leur jugement sur une des notes correspondant aux composantes du spectre et ceux qui l'ont accordé sur une fréquence qui ne correspondait à aucune note. Les effectifs du dernier groupe ont été rapportés à la catégorie "autres". Cette catégorie comprend 44% des sujets pour le son B4a6-i1 et 39% pour le son C520-i1. Pour ces sujets, comme pour l'expérience d'ajustement de hauteur tonale, le critère d'appariement reste indéterminé.

La seconde observation concerne l'émergence de notes spécifiques pour les jugements. Pour le son B4a6-i1, trois notes émergent des jugements : le Do# (14%), le La# (16%) et le Fa# (16%) et correspondent respectivement aux première, seconde et quatrième composantes spectrales. Pour le son C520-i1, les mêmes notes ressortent des jugements : le Do# (15%), le La# (15%) et le Fa# (29%). Elles correspondent également aux première, seconde et quatrième composantes spectrales.

Une analyse des résultats selon les fréquences de départ montre que, parmi les sujets qui se sont basés sur une note du signal, certains accordaient leurs jugements sur différentes notes suivant la fréquence initiale.

En effet, si la fréquence de départ est de 100 Hz, une grande proportion des sujets a apparié la hauteur du son de plaque sur celle de sons purs dont la fréquence est associée à la note Do#. Pour les deux sons de plaque, cette note est associée à la première composante spectrale qui se situe autour de 280 Hz.

Si la fréquence de départ est de 450 Hz, les jugements sont orientés vers le La# qui correspond à la seconde composante spectrale à 450 Hz environ pour les deux sons de plaque.

Enfin, lorsque la fréquence de départ est de 800 Hz, une forte proportion des sujets s'est basée sur le Fa# qui est associé à la quatrième composante spectrale (à 740 Hz environ) des sons B4a6-i1 et C520-i1.

La hauteur tonale d'un son de plaque a été appariée sur celle d'un son pur dont la fréquence était celle de la composante spectrale la plus proche de la fréquence de départ.

E.5 Conclusions

Trois composantes spectrales du signal semblent responsables de la hauteur tonale des sons B4a6-i1 et C520-i1 : autour de 280 Hz (Do#), autour de 450 Hz (La#) et autour de 740 Hz (Fa#). Ce sont les trois composantes qui ont le plus de niveau jusqu'à 2000 Hz. Ces résultats concernent une seule partie des sujets. En effet, deux groupes de sujets se sont distingués. Ceux qui ont basé leurs jugements sur des composantes du signal (à une ou plusieurs octaves près) et ceux pour lesquels le critère reste indéterminé. La méthode que nous avons choisie présentait un inconvénient. En effet, les résultats étaient différents suivant la fréquence de départ du son pur. Les sujets appariaient la hauteur tonale d'un son de plaque sur celle de sons purs, correspondant aux composantes spectrales, et dont les fréquences étaient proches de

la fréquence de départ.

Annexe F

Logiciel d'expertise acoustique

LEA est un Logiciel d'Expertise Acoustique mis au point par la société Genesis (Aix-en Provence). Les principales étapes du logiciel qui permettent de resynthétiser un son modifié sont présentées sur le schéma suivant. Pour les détails sur les approximations numériques, le lecteur pourra se référer à la thèse de F. Jaillet [79].

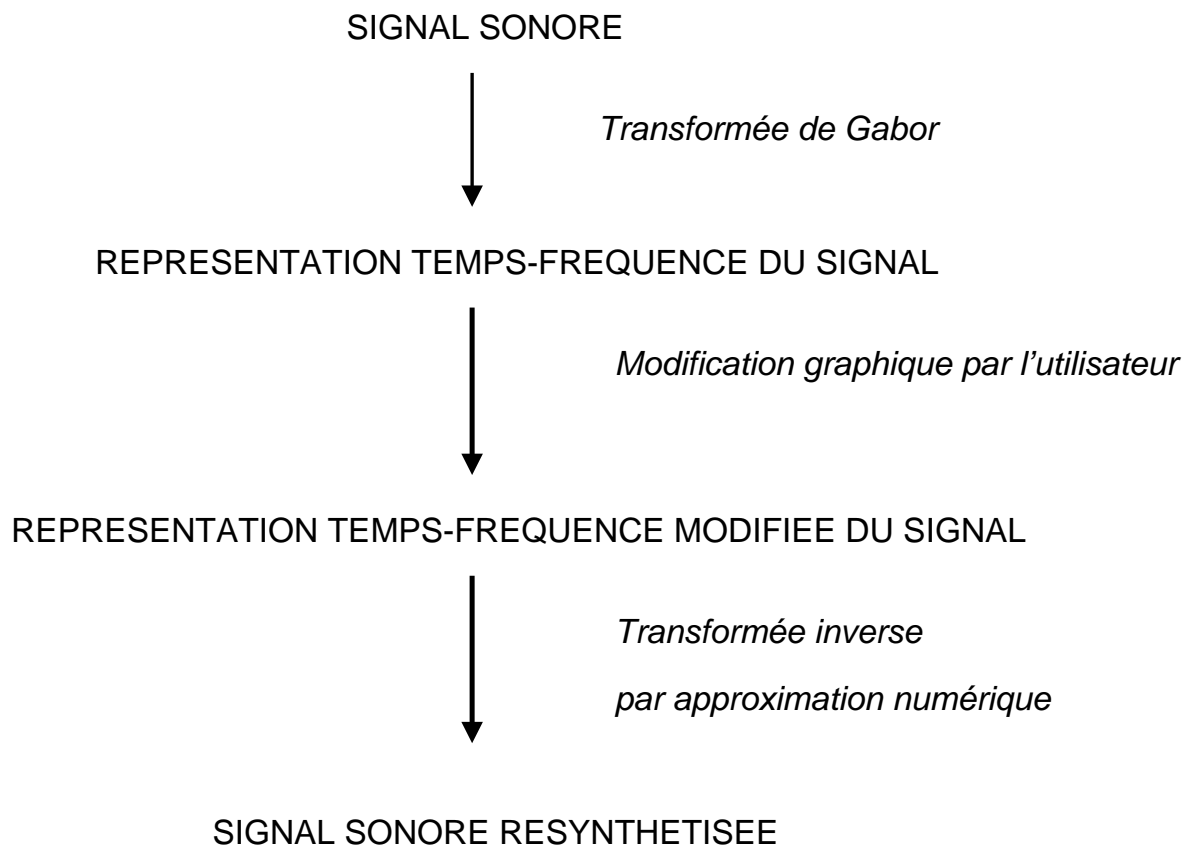


FIG. F.1 – Logiciel d'expertise acoustique

Annexe G

Fréquences de résonance

Le tableau qui suit regroupe les valeurs des fréquences de résonance mesurées puis celles synthétisées avec les valeurs d'épaisseurs équivalentes.

NUMÉRO DES MODES	FRÉQUENCES DE RÉSONANCE		
	MESURÉES	SYNTHÉTISÉES	
		h=1.92 mm	h=1.86 mm
1	25.75	24.91	24.11
2	44.25	46.10	44.64
3	56.25	56.5	54.72
4	75.75	75.95	73.55
5	77.25	79.85	77.33
6	101.5	104.7	101.4
7	107.25	108.31	104.9
8	120.75	123.38	119.51
9	123.25	125.7	121.75
10	150.75	153.16	148.35
11	153.75	154.71	149.85
12	163.75	169.34	164.02
13	176	183.36	177.6
14	185.75	187.65	181.76
15	196.25	198.53	192.3
16	206	210.12	203.52
17	216.25	218.30	211.45
18	250.75	250.41	242.55
19	252.75	252.6	244.65
20	255	254.7	246.71
21	258	261.31	253.11
22	264.5	268.4	259.96
23	272.5	279	270.22
24	296	298.61	289.25
25	311.25	316.7	306.76
26	316	322.92	312.80
27	337.75	333.57	323.11
28	347	341.1	330.40
29	350	347.6	336.68
30	358	359.6	348.34
31	371.5	365.41	353.95
32	376.5	384.25	372.20
33	389.75	395.41	383
34	394.5	395.82	383.41
35	402	403.1	390.47

TAB. G.1 – Fréquences de résonance

Annexe H

Tests préliminaires entre sons enregistrés et sons synthétisés

Le but de ce test était d'identifier les paires de sons les plus semblables puis les critères physiques et perceptifs de similarité.

Vingt-et-un sons ont été enregistrés et les 21 sons respectifs ont été synthétisés. Hormi les durées d'impact, tous les paramètres étaient fixés (longueur, largeur, épaisseur, amortissement et nombre de modes) pour les calculs. L'intérêt était de savoir, à valeurs fixées, quelle était la paire (son enregistré/son synthétisé) la plus semblable. Par conséquent, des tests de dissemblances que nous appellerons "globales" ont été menés.

D'autre part, des différences de fluctuation de niveau ainsi que de hauteur tonale nous semblaient perceptibles. Afin de savoir si elles l'étaient par des auditeurs, nous avons entrepris deux tests de dissemblances "orientés". Pour chaque test, les sujets devaient focaliser leur jugement sur un paramètre particulier des sons : tout d'abord ils devaient évaluer les dissimilarités de fluctuation de niveau et ensuite de hauteur tonale entre un son enregistré et le son de synthèse respectif. L'intérêt de ces deux derniers tests était également de savoir si les dissemblances "orientées" étaient corrélées aux dissemblances globales.

H.1 Sujets

Dix-huit auditeurs ont participé à cette expérience. Ils étaient tous bénévoles, membres du laboratoire et âgés de 22 à 62 ans.

H.2 Sons

Vingt-et-un sons enregistrés ont été testés (3 fois 7 points d'impact). Les durées d'impact correspondantes sont présentées au tableau 5.5. Les signaux de synthèse ont été calculés sur une durée de 5s et sur 200 modes, ce qui correspond à une fréquence maximale de 2000 Hz environ ; ceci nous semblait suffisant pour bien décrire le son enregistré. Les propriétés mécaniques et géométriques utilisées dans le modèle sont les mêmes que celles décrites au paragraphe 5.3 excepté pour l'épaisseur qui

était de 2 mm. Elle a été choisie de telle sorte à ce que le premier partiel du signal synthétisé concorde avec le premier partiel du signal enregistré. Ce choix arbitraire a été effectué car nous pensions (avant d'établir la comparaison objective) que les signaux pouvaient être au mieux recalés si les premières fréquences de résonance de chaque signal concordait. L'amortissement a été fixé à $1,8 \cdot 10^{-3}$. Les signaux ont été normalisés de telle sorte à ce que le maximum en valeur absolu soit égal à 1. Ces signaux ont ensuite été égalisés en sonie par les expérimentateurs par écoute des sons. Le niveau global des signaux était de l'ordre de 70 phones.

H.3 Protocole

Trois tests ont été mis en place. Le premier est un test de dissemblances "globales". Les sujets devaient évaluer les dissemblances entre un son enregistré et le son de synthèse respectif. Les sons étaient présentés par paires. Les paires ainsi que l'ordre de passage des sons dans les paires étaient aléatoires.

Les deux autres tests étaient des tests de dissemblances "orientés". Pour chaque test, les sujets devaient juger les dissimilarités sur un paramètre particulier des sons : sur la hauteur tonale dans un premier test puis sur les fluctuations de niveau dans un second test. L'ordre de passage des deux derniers tests était aléatoire.

Pour chaque test, le dispositif (description du matériel) utilisé pour restituer les sons ainsi que la procédure utilisée pour évaluer les dissemblances était la même que celle présentée au paragraphe 3.3 du chapitre 3.

H.4 Résultats

La figure H.1 présente les moyennes des dissemblances globales, de hauteur tonale et de fluctuations de niveau pour chaque paire de sons. Chaque point d'impact est représenté par un symbole différent, figurant sur la légende. Par exemple, les trois premières paires de signaux correspondent aux cercles c'est-à-dire au point d'impact 1. Les barres verticales sur les trois figures représentent les écarts-types.

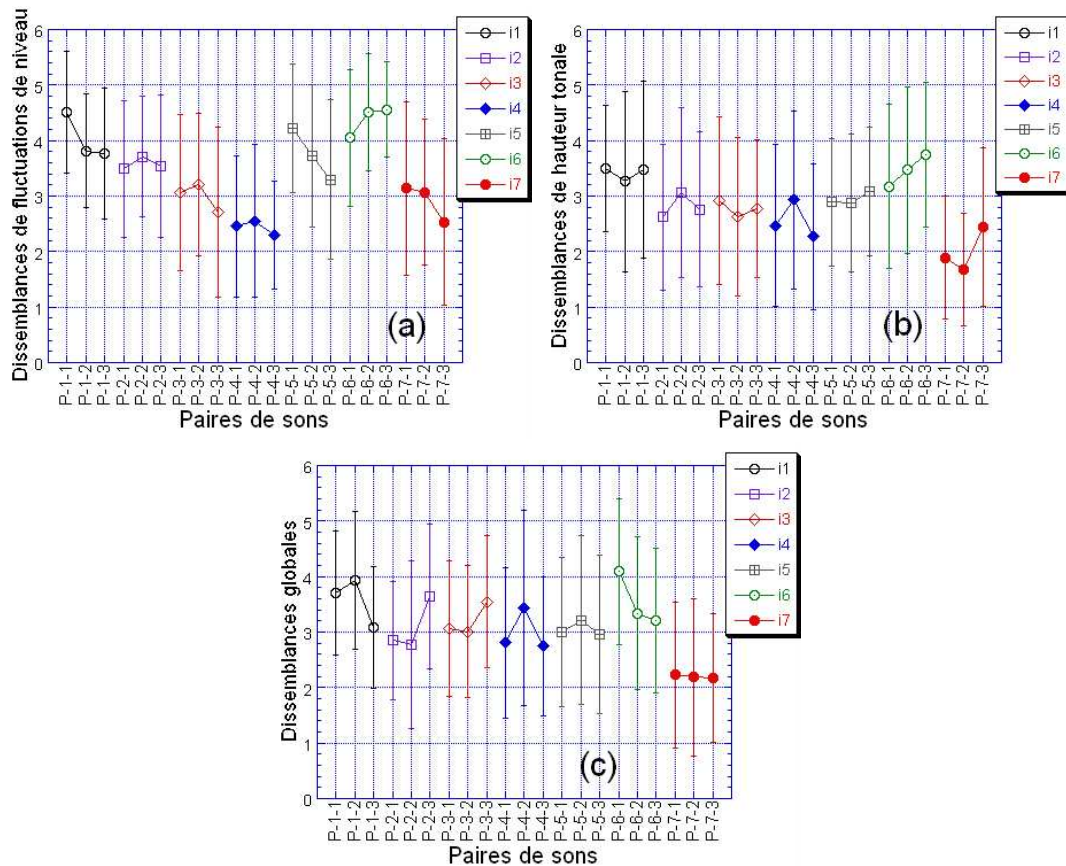


FIG. H.1 – Dissemblances de fluctuations de niveau (a), de hauteur tonale (b) et globales (c) pour chaque paire de son (enregistré/synthétisé). Les symboles sont différents pour chaque point d'impact.

H.5 Interprétation

La première observation concerne les écarts-types. Ils sont importants (>1) pour l'ensemble des résultats. Ils s'expliquent par les divergences des jugements des auditeurs. En effet, pour une paire donnée, les jugements évoluaient de très semblables à très dissemblables suivant les sujets. Cette remarque est valable pour l'ensemble des jugements.

La seconde remarque porte sur les moyennes de ces jugements. Les valeurs varient de 2,1 à 4,1 suivant les paires de sons pour les dissemblances globales, de 1,6 à 3,8 pour les dissemblances de hauteur tonale et de 2,4 à 4,6 pour celles de fluctuation de niveau. Les paires ont été jugées moyennement semblables dans l'ensemble. Peu de paires paraissaient effectivement semblables ou dissemblables. Ceci est la conséquence des divergences de jugements des sujets sur les paires de sons.

Les graphiques à la figure H.2 présentent les jugements de dissemblances globales en fonction des dissemblances de fluctuation de niveau et des dissemblances de hauteur tonale.

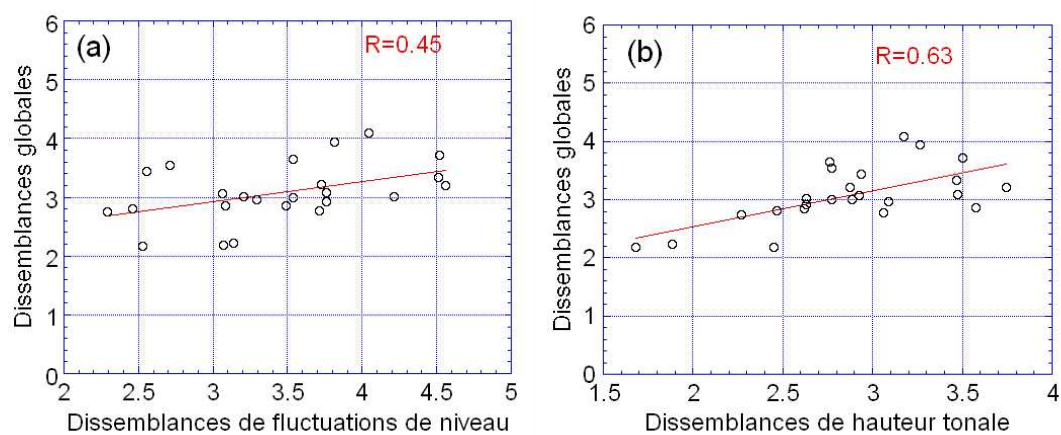


FIG. H.2 – Dissemblances globales en fonction des dissemblances de fluctuations de niveau (a) et en fonction des dissemblances de hauteur tonale (b)

Les dissemblances globales sont légèrement liées aux dissemblances de fluctuations de niveau et à celles de hauteur tonale bien que les corrélations soient faibles ($R=0,45$ et $0,63$ respectivement). Les sujets ont peut-être sensiblement utilisé les critères de hauteur tonale et de fluctuation de niveau lors de leurs jugements de dissemblances globales.

Les sujets ont été questionnés à la suite du test. Ils ont indiqué avoir effectivement entendu des différences de fluctuations de niveau et de hauteur tonale mais ont également signalé leur difficulté à effectuer la tâche pour quantifier les dissemblances. Pour eux, beaucoup trop de paramètres variaient simultanément sur 5s.

H.6 Conclusion

Les sons ont été jugés dans l'ensemble moyennement semblables si bien que nous n'avons pas pu identifier des paires de sons plus semblables que d'autres. De plus, les dissemblances globales sont peu corrélées aux dissemblances de fluctuations de niveau et à celles de hauteur tonale. Les sujets ont pourtant affirmé avoir perçu ces différences mais ont éprouvé des difficultés pour les estimer.

Dans la suite, pour évaluer les dissemblances perceptives, les sons pourraient être testés sur chaque portion : transitoire, intermédiaire et amortie. Ceci permettrait d'isoler les différences sur chaque partie indépendamment les unes des autres.

Annexe I

Différences de niveau entre sons enregistrés et sons synthétisés

Les figures I.1, I.2 et I.3 présentent le niveau des signaux enregistrés aux fréquences de résonances en décibel en fonction des fréquences de résonance mesurées, pour les portions transitoire, intermédiaire et amortie. Les barres verticales représentent les différences de niveau ΔN_i , aux résonances, entre le spectre du signal synthétisé et celui du signal enregistré.

Une décomposition de l'analyse sur chaque portion de signal montre que sur la partie transitoire, les différences de niveau sont assez faibles surtout à basses fréquences. Néanmoins, la partie transitoire est la plus brève (100 ms). Par conséquent, les spectres ont été calculés avec un pas fréquentiel de 10 Hz. Ceci signifie que les différences ne sont pas évaluées exactement aux résonances et qu'elles peuvent alors être erronées.

Sur la partie intermédiaire, sur la figure I.2, de forts écarts de niveau sont observés à certaines fréquences de résonance. Par exemple, à 440 Hz pour les paires P-2-3 et P-5-3 les écarts sont de l'ordre de 30 dB. Vraisemblablement, l'amortissement par rayonnement¹ est mal décrit à cette fréquence.

Sur la partie amortie, sur les graphiques de la figure I.3, deux faits se démarquent :

- Entre 350 et 400 Hz, les niveaux des composantes des signaux synthétisés ne sont pas suffisamment amortis pour l'ensemble des signaux (écarts variant de 15 à 22 dB). Cette bande de fréquence correspond à la 5^{ème} bande de Bark. Or, dans cette bande les niveaux des composantes des signaux enregistrés étaient totalement atténués (voir figure 5.9). On l'observe aussi sur les graphiques de la figure I.3 où les niveaux des composantes des sons enregistrés sont inférieurs à 10 dB entre 350 et 400 Hz. C'était la raison pour laquelle, pour déterminer une valeur d'amortissement nous avons étudié seulement les décroissances de niveau dans les quatre premières bandes de Bark. C'est pourquoi, la valeur d'amortissement globale égale à 1.10^{-3} n'est pas valable sur la bande de fréquence 350-400 Hz et par conséquent les écarts de niveau sont importants.

¹il résulte du couplage entre la plaque et le fluide et varie selon les fréquences de résonance

- De forts écarts de niveaux sont observés à la première composante spectrale excepté pour les paires P-3-2 et P-4-2. Le niveau de cette composante pour les sons enregistrés chute considérablement.

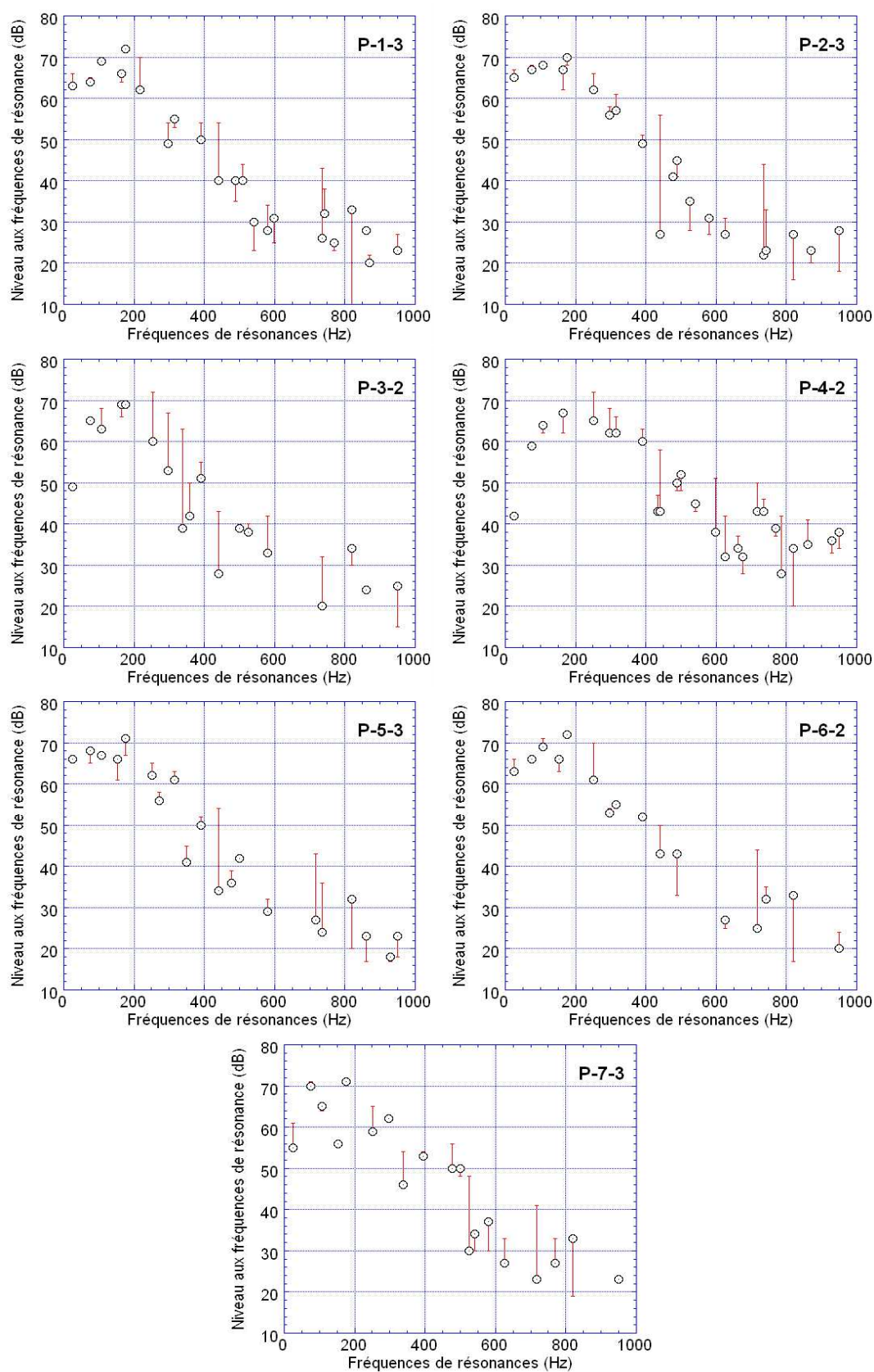


FIG. I.1 – Niveau de chaque fréquence de résonance du signal enregistré pour le cas de la partie transitoire. Les barres verticales indiquent les différences de niveau ΔN à chaque fréquence de résonance entre le signal synthétisé et le signal mesuré

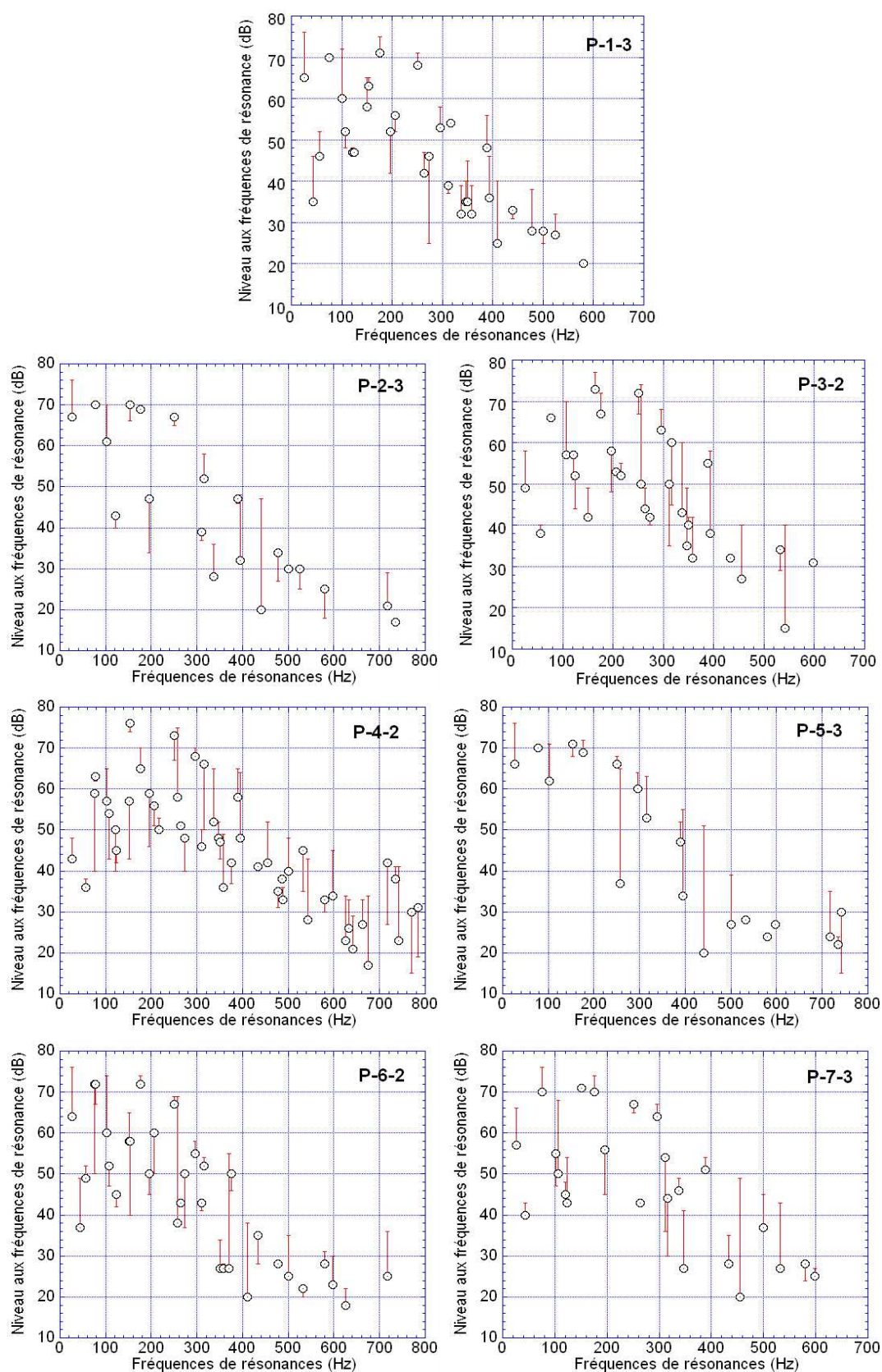


FIG. I.2 – Niveau de chaque fréquence de résonance du signal enregistré pour le cas de la partie intermédiaire. Les barres verticales indiquent les différences de niveau ΔN à chaque fréquence de résonance entre le signal synthétisé et le signal mesuré

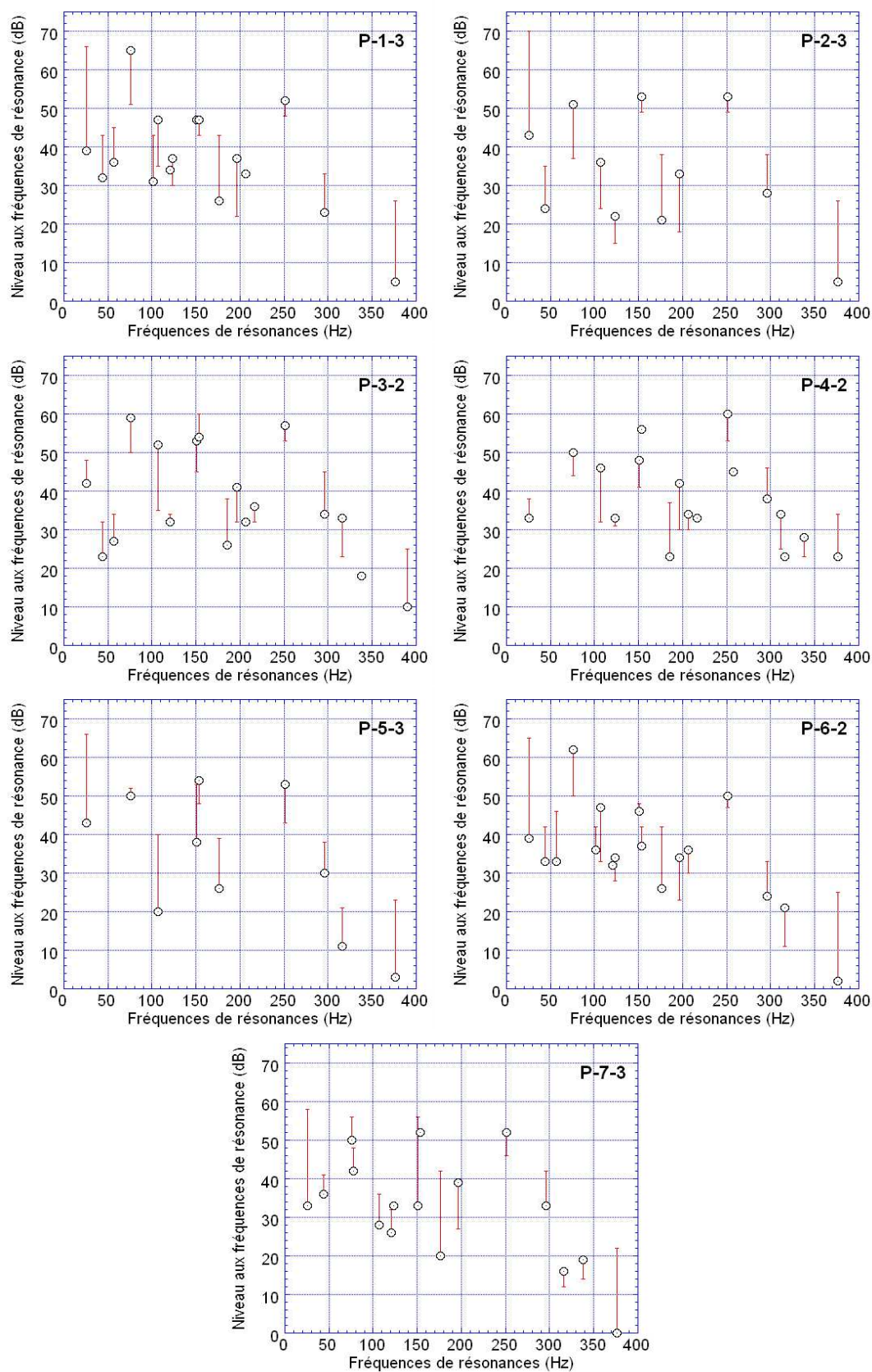


FIG. I.3 – Niveau de chaque fréquence de résonance du signal enregistré pour le cas de la partie amortie. Les barres verticales indiquent les différences de niveau ΔN à chaque fréquence de résonance entre le signal synthétisé et le signal mesuré

Annexe J

Comparaison perceptive entre son enregistré et sons synthisés : influence des fluctuations de niveau

Le graphique qui suit présente la corrélation entre la dimension 2 de la portion intermédiaire étudiée et la fréquence de modulation des signaux.

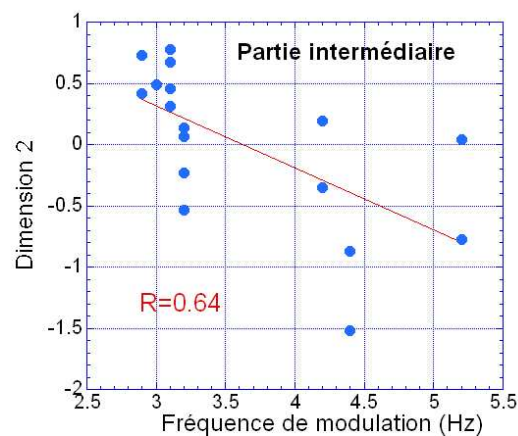


FIG. J.1 – Corrélation entre la dimension 2 et la fréquence de modulation des signaux

Résumé

Cette thèse présente une recherche en psychomécanique qui est une combinaison d'études vibroacoustiques et psychoacoustiques. Un des buts de la psychomécanique est d'identifier les attributs perceptifs qui sont pertinents pour la perception auditive de sons rayonnés par des structures vibrantes.

Le travail porte sur la perception des sons rayonnés par une plaque mince, rectangulaire, encastrée, bafflée et soumise à une excitation de durée finie. Trois études ont été réalisées.

La première étude met en évidence l'effet perceptif de la variation des paramètres mécaniques de la plaque (amortissement) ou de l'excitation (durée et lieu d'impact) en terme de perception de la qualité et de la similarité des sons. Une analyse multidimensionnelle des sons a montré que les dimensions perceptives traduisant les différences entre les sons étaient : la brillance, la tonalité sur la portion des sons dite "résonante" et l'acuité sur la portion dite "initiale". Pour les estimations d'agrément, deux groupes de sujets se sont distingués. Une première moitié du groupe a basé ses jugements sur la brillance des sons estimant que l'agrément décroissait avec une augmentation de brillance. Les jugements de la seconde moitié des sujets étaient basés sur l'intérêt musical des sons ; plus les sons étaient amortis, moins ils présentaient un intérêt musical, moins ils étaient agréables. La seconde étude concerne le problème de la simplification de modèles complexes de plaques en se basant sur des critères perceptifs. La complexité concerne l'épaisseur de la plaque. Il est montré qu'un son de plaque d'épaisseur variable peut être perceptivement similaire à un son de plaque d'épaisseur constante "équivalente" ; le critère de similarité étant la hauteur tonale des sons déterminée par la composante spectrale de plus forte intensité.

La dernière étude aborde le problème de la comparaison entre sons enregistrés et sons synthétisés de plaques. Le but est d'identifier les paramètres importants à prendre en compte dans le calcul de telle sorte que le son synthétisé soit le plus proche du son enregistré d'un point de vue perceptif. Les résultats montrent que, dans notre cas, le son synthétisé le plus proche du son enregistré correspond à une concordance de hauteur tonale, de fluctuation de niveau et de décroissance des signaux.

Abstract

This thesis presents a psychomechanic investigation which is a combination of vibroacoustic and psychoacoustic studies. One of the aims of psychomechanics is to extract perceptual attributes which are relevant for the auditory perception of sounds radiated by vibrating structures.

This work deals with the perception of sounds radiated by a rectangular, thin, baffled, elastic, clamped plate which is excited by a transient point force. Three studies were undertaken.

The first one concerns the perceptual effect of the variation of mechanical parameters (structural damping) or characteristics of the excitation (duration and location of the impact) in terms of perception of quality and similarity of sounds. A Multi Dimensional Scaling of sounds showed that the perceptual dimensions were linked to brightness, tonal character of the "resonant" part of sounds and sharpness of the "initial" part of sounds. Two groups of subjects were found for the pleasantness estimations. Half of subjects based their judgement on the brightness of the sounds judged that quality decreased with increasing brightness. The other half of subjects, considering the stronger musical character of sounds, judged that the low damping signals were higher quality.

For the second work, in order to reduce the complexity of the vibroacoustic model, we want to know if a plate with variable thickness can be modeled by a constant-thickness one that would be equivalent, from a perceptual point of view. In some cases, an equivalent thickness is found and corresponds to a similarity of pitch related to the partial having the higher energy.

The last work concerns the comparison between recorded and computed sounds of plates. The aim is to identify the most important parameters to take into account so that computed and recorded sounds are very similar from a perceptual point of view. The results shows that, the synthesized sound which is the most similar to the recorded one corresponds to a similarity of pitch, fluctuation strength and decrease of level.